

ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR, ULTRAVIOLETA Y OZONO DE COLOMBIA

ASPECTOS TEÓRICOS

1. EL SOL

El Sol es la principal fuente primaria de luz y calor para la Tierra. Un análisis de su composición en función de su masa establece que contiene un 71% de Hidrógeno, un 27% de Helio y un 2% de otros elementos más pesados. Debido a que el Sol es gas y plasma, su rotación cambia con la latitud: un periodo de 24 días en el ecuador y cerca de 36 días en los polos (Ver tabla 1). La diferencia en la velocidad rotacional conjuntamente con el movimiento de los gases altamente ionizados generan sus campos magnéticos (Ver figura 1). El Sol es la estrella más próxima a la Tierra y se encuentra a una distancia promedio de 150 millones de kilómetros.

Tabla 1. El Sol en Números

Masa (kg)	1,989x10 ³⁰
Masa (Tierra = 1)	332.830
Radio ecuatorial (km)	695.000
Radio ecuatorial (Tierra = 1, equivalente a 6367 km en promedio)	108,97
Gravedad en su superficie (Tierra=1)	28
Densidad	1,41
Período Rotacional (días)	25-36
Energía radiada por su superficie (kw/m ²)	63.000
Energía emitida por segundo	
Kilovatios	3,96x10 ²³
Temperatura media en la superficie	5.800°K
Edad (miles de millones de años)	4,5
Componentes químicos principales	
	Porcentaje*
Hidrógeno	92,1%
Helio	7,8%
Oxígeno	0,061%
Carbono	0,030%
Nitrógeno	0,0084%
Neón	0,0076%
Hierro	0,0037%
Silicio	0,0031%
Otros	0,0015%

* Porcentaje en función del número de átomos.

(Elaborada y ampliada a partir de: <http://www.solarviews.com/span/sun.htm#stats>).

El Sol contiene más del 99% de toda la materia del Sistema Solar y se formó hace 4.500 millones de años. Ejerce una fuerte atracción gravitatoria sobre los planetas y los hace girar a su alrededor.

2. ESTRUCTURA SOLAR

El Sol se encuentra formado por seis regiones principales (Figura 2):

- **El núcleo:** contiene un 40% de la masa del Sol, menos del 2% del volumen total, ocupa un cuarto del radio solar y genera el 90% de su energía, en un proceso de fusión termonuclear en el cual el hidrógeno se transforma en helio. El hidrógeno contenido en el núcleo del Sol se encuentra ionizado como protones, los cuales se fusionan formando núcleos atómicos de helio, liberando energía en el proceso. Su temperatura se estima en 15 millones de grados Kelvin (°K) y su densidad de 150 gm/cm³.

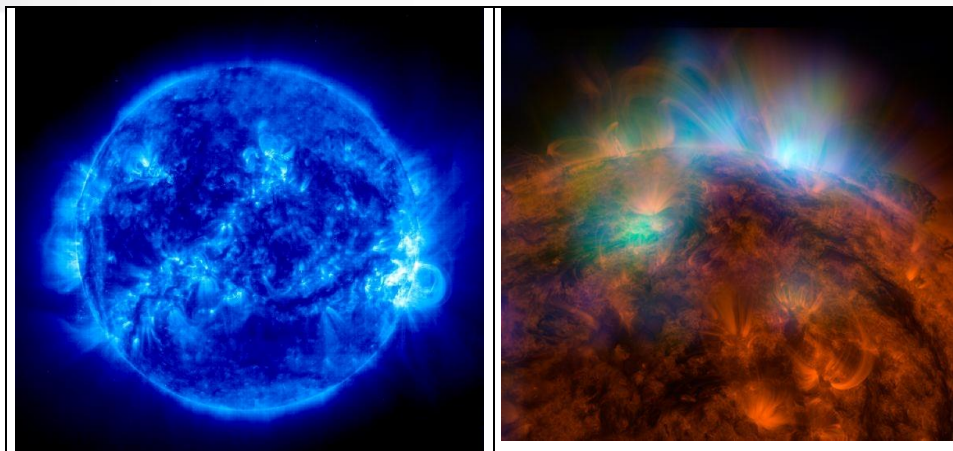


Figura 1. Imágenes del Sol tomadas en canales de luz ultravioleta lejana (171Å) y de rayos X de alta energía, obtenidas por el Observatorio Solar y Hemisférico (SOHO) y por el Observatorio de Dinámica Solar (SDO).
 (Fuente: NASA)

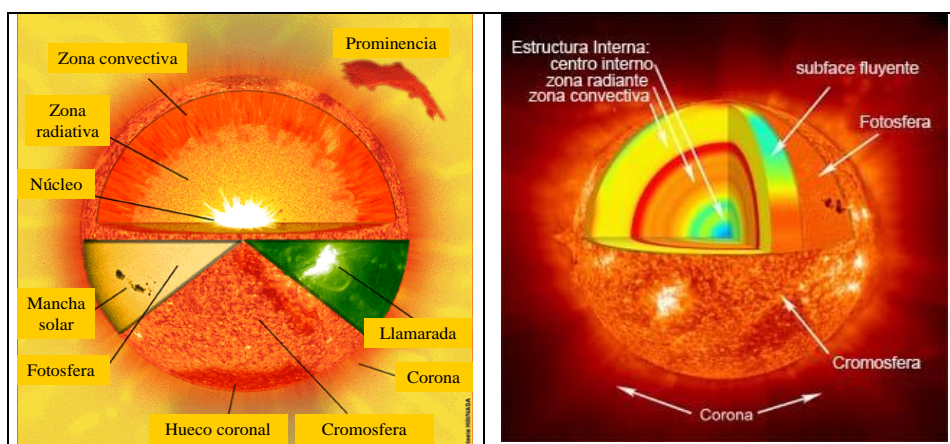


Figura 2. Estructura del Sol. (Fuente: NASA-ECURED).

- **La zona radiativa:** circunda al núcleo y contiene un gas tan denso que los fotones o radiación electromagnética provenientes del núcleo, duran cientos de miles de años atravesando esta zona para poder llegar a la superficie del Sol. La energía generada en el núcleo se difunde a través de la zona radiativa por absorción y emisión atómica. Las temperaturas en esta región alcanzan los 130.000 °K. Esta zona está localizada a una distancia entre 160.000 km y 485.000 km del centro solar.
- **Zona convectiva,** es una región con mucha agitación donde circula el plasma y los gases ascienden muy calientes, se enfrían y descienden. Esta circulación es el principal mecanismo de transferencia de energía a la superficie solar. Estos procesos convectivos son observados en la superficie del Sol como pequeños gránulos y supergránulos en forma de celdas de 3.000 km de radio (Ver figura 3).
- **La Fotosfera,** es la superficie visible del Sol que rodea la zona convectiva y posee un espesor de aproximadamente 300 Km, es gaseosa y de baja densidad (10^{-8} g/cm³). Sus gases están fuertemente ionizados y con la capacidad de absorber y emitir radiación. La mayor parte de la radiación solar que nos llega proviene de esta capa, su temperatura es cercana a los 5.800 °K. En esta zona se observan áreas oscuras llamadas manchas solares, las cuales son las partes

más frías de la superficie con temperaturas de 3.800 °K. Su tamaño es similar al de un planeta; allí se presentan intensos rizados magnéticos. En esta región también se presentan las erupciones solares, que son las explosiones más poderosas del sistema solar. Estas poseen un poder explosivo que equivale a cien millones de bombas de hidrógeno y destruyen todo lo que se encuentre cerca de ellas, sin dejar intacto un sólo átomo (ver figura 4).

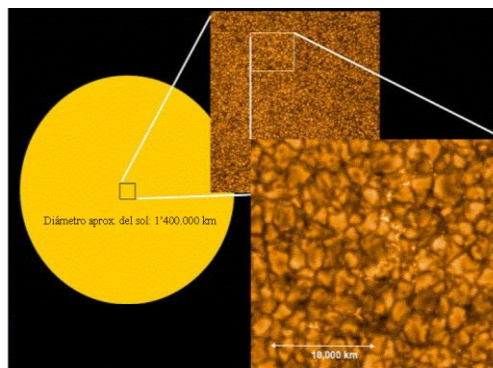


Figura 3. A partir del Telescopio Solar Óptico, a bordo de la nave japonesa Hinode, se muestra en detalle la granulación solar (celdas convectivas) y en los puntos brillantes entre los gránulos se concentran los campos magnéticos. (Fuente: NASA).

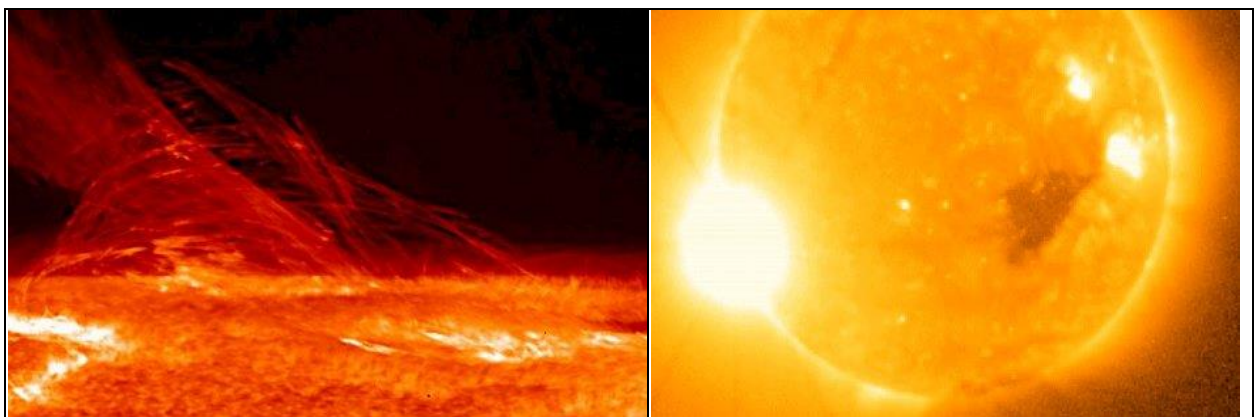


Figura 4. En la izquierda una erupción solar registrada por la nave espacial Hinode de la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA). En la figura de la derecha se presenta una de las erupciones solares más intensas de los últimos 30 años, captada el 5 de diciembre de 2006 por la Cámara para Imágenes Solares de Rayos-X (Solar X-Ray Imager), ubicada en el satélite GOES-13 de la NOAA. (Fuente: NASA).

La mayoría de las erupciones suceden alrededor de manchas solares, donde emergen intensos campos magnéticos de la superficie del Sol hacia la corona. Se cree que la erupción más poderosa de los últimos 500 años sucedió en septiembre de 1859: fue observada por el astrónomo británico Richard Carrington y dejó rastros en el hielo de Groenlandia en forma de nitratos y berilio-10, que permite medir su potencia aún hoy.

- **La Cromosfera**, que está justo sobre la fotosfera, es una fina región de gas que se observa con un color rojizo-anaranjado, de unos 10.000 Km de espesor. Es esencialmente transparente a la radiación emitida desde la fotosfera.
- **La Corona**, es la tenue atmósfera exterior compuesta de un halo, el cual, sólo se ve durante los eclipses totales de Sol.

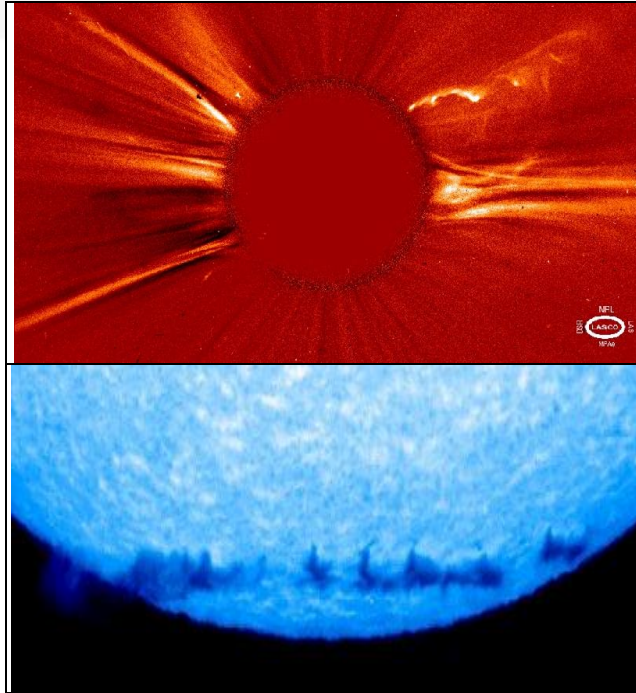


Figura 5. En la figura superior se muestra el halo coronal y una erupción (derecha de la figura) hacia el Ecuador del Sol el 21 de agosto de 1996. Abajo, se muestra la corona polar del sur del Sol. (Fuente: NASA).

Finalmente tenemos:

- **Las eyecciones de masa coronal** (CMEs, por su sigla en idioma inglés) del Sol, son nubes de plasma hechas de radiación y viento solar que se desprende del Sol en el periodo de máxima actividad solar, que ocurre cada 11 años (ver figura 6). Esta onda (o nube) es muy peligrosa ya que, si llega a la Tierra y su campo magnético está orientado al sur, puede dañar los circuitos eléctricos, los transformadores y los sistemas de comunicación, además de reducir el campo magnético de la Tierra por un período. Cuando esto ocurre, se dice que hay una tormenta solar. Sin embargo, si está orientada al norte, rebotará inofensivamente en la magnetosfera.

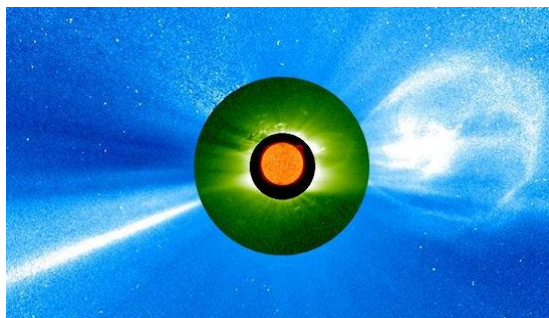


Figura 6. Eyección de masa coronal (CME), observada por la nave STEREO de la NASA el 12 de diciembre de 2008. (Fuente: NASA)

- **El viento solar** es una corriente de partículas cargadas expulsadas de la atmósfera superior del Sol (o de una estrella en general). Este viento consiste principalmente de electrones y protones con energías por lo general entre 10 y 100 keV. El flujo de partículas varía en la temperatura y la velocidad con el tiempo. Estas partículas pueden escapar de la gravedad del Sol debido a su alta energía cinética y la alta temperatura de la corona. El viento solar crea la heliosfera, una burbuja enorme en el medio interestelar que rodea el Sistema Solar.

3 CICLO SOLAR

La energía producida por el Sol no se emite uniformemente a través de su superficie sino que sufre variaciones, con épocas de emisión máxima y otras de mínima, con un período aproximado de 11 años. Este período se conoce como el Ciclo Solar y se determina por el número de manchas solares. La luminosidad de nuestro Sol varía apenas un 0,1% a lo largo de su ciclo solar. Sin embargo estas aparentemente diminutas variaciones pueden tener un efecto significativo sobre el clima de la Tierra.

En la fotosfera (capa exterior del Sol que se ve), se forman las manchas solares (Ver figura 7), que son regiones de la superficie solar representadas por zonas oscuras, frías, extremadamente magnetizadas y efímeras, cuyo diámetro puede superar los 130.000 Km. Las temperaturas en los centros oscuros de las manchas solares caen a unos 3700 °K (en comparación con los 5800 °K que hay en la fotosfera circundante). Una mancha solar sólo dura unos pocos días o semanas antes de desaparecer y tan pronto como una de ellas desaparece, otra emerge y toma su lugar.

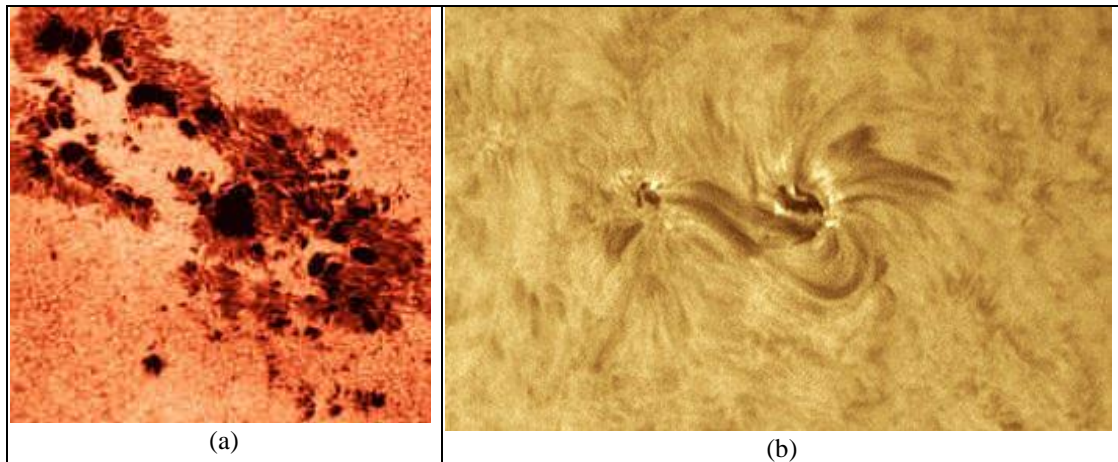


Figura 7. (a) Manchas solares. (Fuente: Solarviews). (b) Se observa una de las manchas solares más grande del ciclo número 24, formada el 31 de octubre de 2008. Esta mancha tenía dos núcleos oscuros cada uno más ancho que el diámetro de la Tierra, los cuales estaban conectados por filamentos magnéticos activos de miles de kilómetros de longitud. (Fuente: NASA).

En las manchas solares las líneas de los potentes campos magnéticos del Sol (miles de veces más fuertes que el campo magnético de la Tierra), emergen de la fotosfera y forman extensos bucles magnéticos locales. Estas erupciones se deben a que la parte ecuatorial de la superficie solar gira más rápido que en las otras latitudes. Los potentes campos magnéticos presentes en las manchas inhiben el flujo local de calor procedente de las capas inferiores, de forma que son entre unos 1.500 °K y 2.000 °K más frías y por tanto más oscuras que el resto de la superficie visible.

El número de manchas solares en el Sol no es constante y cambia en el período de 11 años en promedio (Ver figura 8), estando la actividad solar directamente relacionada con ese ciclo. Cada once años las manchas desaparecen y cuando nuevamente aparecen tienen invertida la polaridad. El período promedio de un ciclo solar es de 131 meses, con una desviación estándar de 14 meses.

Los extremos del ciclo son el mínimo solar y el máximo solar. El ciclo solar no es exactamente de 11 años. Su longitud, medida desde el mínimo hasta el máximo, varía: el más corto puede ser de 9 años, y el más largo de 14. En el máximo, el Sol se encuentra salpicado con manchas, intensas ráfagas, erupciones solares y arroja miles de millones de toneladas de nubes y gas electrificado hacia la Tierra. Es un buen momento para observar las auroras (en Florida es posible verlas).

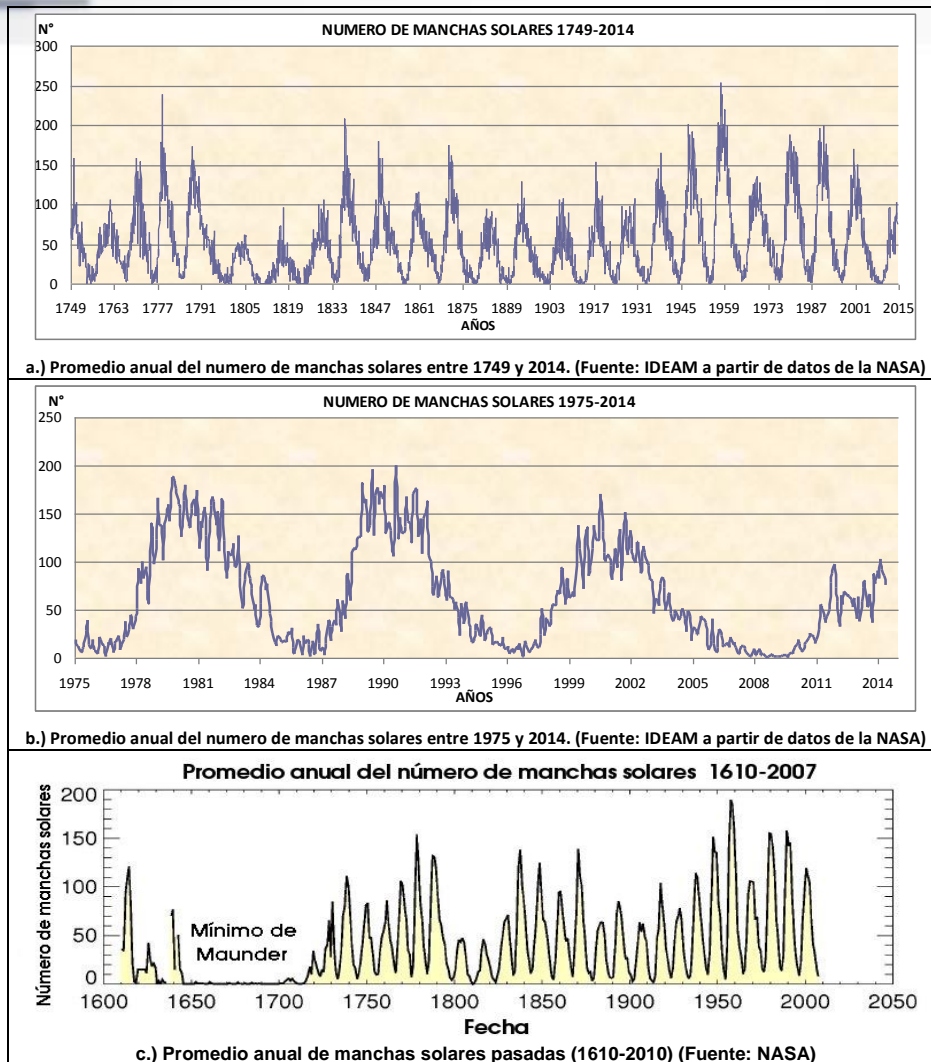


Figura 8. Numero de manchas solares pasadas y futuras. (Fuente NASA)

La actividad magnética que acompaña a las manchas solares puede producir cambios dramáticos en los niveles de emisiones ultravioleta y de rayos X. Fluctuaciones en la potencia eléctrica, satélites inutilizados, defectos en el funcionamiento de los dispositivos GPS, son ejemplos de lo que puede pasar durante el máximo de actividad solar. Los máximos solares pueden ser intensos como el del año 1957, o apenas detectables como el de 1805 (Ver figura 8a). El mínimo solar es diferente. Las manchas solares son pocas, a veces, pueden pasar días o semanas sin una mancha. Las llamaradas solares disminuyen.

El mínimo más largo del que se tenga registro, el Mínimo de Maunder (1645-1715, ver figura 8c), duró un increíble período de 70 años. Raramente se observaron manchas solares y el ciclo solar parecía haberse roto por completo. El período de calma coincidió con una Pequeña Edad de Hielo y una serie de inviernos extraordinariamente fuertes en el hemisferio norte de la Tierra. Muchos investigadores están convencidos de que esa baja actividad solar, conjuntamente con un aumento de la actividad volcánica y posibles cambios en patrones de corrientes oceánicas, desempeñaron un papel en el enfriamiento del siglo XVII. Por razones que nadie entiende, el ciclo de manchas solares revivió en los inicios del siglo XVIII y ha continuado desde entonces con el familiar período de 11 años.

Desde que los investigadores comenzaron a numerar los ciclos solares a mediados del siglo XVIII, han ocurrido 24 de ellos. Durante este tiempo, la depresión en la actividad solar más grande, tuvo lugar a principios del siglo XIX y se ha denominado el Mínimo de Dalton.

El número de manchas solares es el mejor indicador conocido de la actividad solar y sirve para predecir, con años de anticipación, cuando aparecerán los próximos picos y valles. El último máximo del ciclo solar ocurrió entre los años 2000 y 2003 (ver figura 9) y tuvo muchas tormentas solares. Ese ciclo decayó, como se esperaba, hasta llegar a la quietud a finales del año 2007 y persistió sobre el 2008 y el 2009. Es de anotar que este mínimo solar particularmente fue más largo de lo usual.

La relación entre el clima y la actividad solar es fuerte y la variabilidad solar es tomada como la principal y única fuente natural de la variabilidad del clima de la Tierra. Se han efectuado relaciones entre el ciclo de once años de las manchas solares con el clima y parece existir una respuesta en el comportamiento de algunos parámetros climáticos, como la cantidad de ozono estratosférico y la temperatura de la Tierra y su atmósfera.

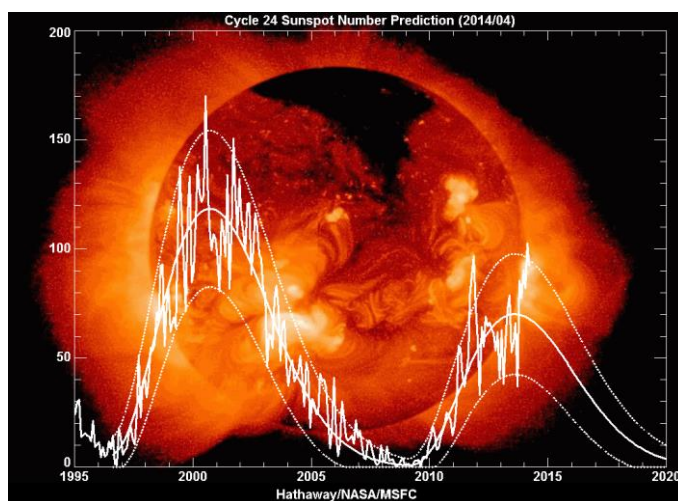


Figura 9. Predicción del número de manchas solares según el Centro Marshall de Vuelos Espaciales de la NASA. (Fuente: NASA).

4. RELACIONES ASTRONÓMICAS SOL-TIERRA

4.1 Distancia Tierra – Sol

La Tierra en su movimiento alrededor del Sol describe una órbita elíptica, algo desproporcionada, con uno de sus extremos un poco más cerca del Sol que el otro y en la cual la distancia promedio Tierra - Sol es de aproximadamente $149,46 \times 10^6$ Km (aprox. $1,5 \times 10^{11}$ m), valor llamado Unidad Astronómica (U.A.). La excentricidad de la órbita de la Tierra es del 1,7%.

La órbita de la Tierra se puede describir en coordenadas polares mediante la siguiente expresión:

$$R = \frac{UA (1-e^2)}{(1+ e \cos \alpha)} \quad (4-1)$$

Donde:

R = Distancia tierra sol para cualquier día del año.

UA = Unidad Astronómica

e = excentricidad de la órbita terrestre ($e = 0,01673$)

a = posición angular de la Tierra en la órbita, la cual se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$a = \frac{2\pi (nd - 1)}{365} \quad (4-2)$$

nd = día juliano del año (día consecutivo y va desde 1 el primero de enero hasta 365 el 31 de diciembre)

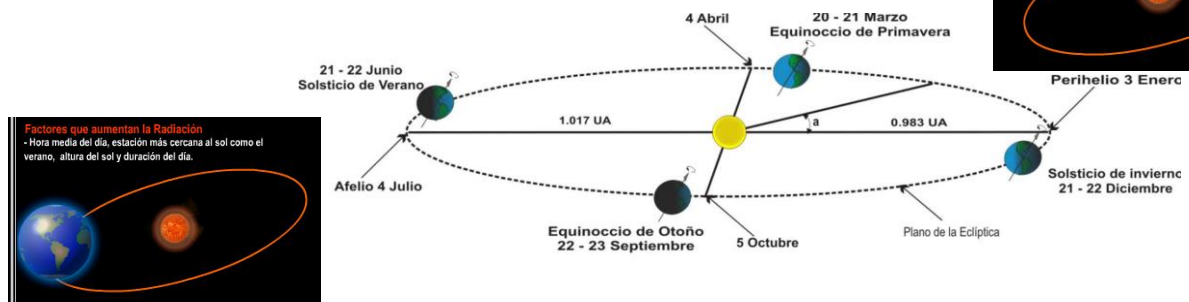


Figura 10. Movimiento de la tierra alrededor del Sol. (Fuente: Atlas, 2005).

En la figura 10, se muestra la posición angular (a) de la Tierra en la órbita. Cuando $a = 0^\circ$ la Tierra se encuentra más cerca del Sol (Perihelio), esto ocurre en enero y la distancia Tierra-Sol es de $R = UA (1-e) = 0,983UA = 147,5$ millones de km. En julio, cuando $a = 180^\circ$, la Tierra se encuentra en la posición más alejada del Sol (Afelio), con una distancia Tierra-Sol de $R = UA (1+e) = 1,017UA = 152,6$ millones de km.

Un Sol distante significa menos radiación solar para nuestro planeta. La radiación del Sol en promedio sobre la Tierra durante el afelio es aproximadamente un 7% menos intensa de lo que es durante el perihelio sobre el globo,

La distancia R se puede calcular para cada día del año, mediante la siguiente ecuación determinada por J.W. Spencer:

$$E_o = (R_o/R)^2 = 1,00011 + 0,034221 \cos a + 0,00128 \sin a + 0,000719 \cos 2a + 0,000077 \sin 2a \quad (4-3)$$

Donde:

R_o = Distancia promedio de la Tierra al Sol (1 U.A),

E_o = Conocido como el factor de corrección por excentricidad de la órbita terrestre.

Cuando se analiza el movimiento de rotación y translación de la Tierra se encuentra que su eje de rotación, con respecto al plano de translación alrededor del Sol, tiene una inclinación de aproximadamente $23,45^\circ$. Los patrones climáticos de las estaciones se originan principalmente por la inclinación del eje de rotación. El ángulo formado entre el plano ecuatorial de la Tierra y la línea Tierra-Sol se denomina declinación solar (δ), como se aprecia en la figura 11. El signo de la declinación es positivo (+) cuando el Sol incide perpendicularmente sobre algún lugar en el hemisferio norte, y negativo (-) cuando incide perpendicularmente sobre algún lugar en el hemisferio sur.

Debido al movimiento de la Tierra alrededor del Sol, el valor del ángulo varía durante el año. Su valor varía entre $-23,45^\circ$, cuando el Sol se encuentra en la parte más baja del hemisferio sur en el Solsticio de invierno (22 de diciembre) y $+23,45^\circ$ cuando se halla en la parte más alta del hemisferio norte, en el Solsticio de verano (21 de junio), siendo el día más largo del año. Dos veces en el año toma el valor de cero, cuando el Sol pasa sobre el Ecuador terrestre, durante los

equinoccios (de otoño el 23 de septiembre, y el de primavera el 21 de marzo). En el equinoccio (del latín: noche igual) la noche y el día tienen la misma duración en todos los lugares de la Tierra.

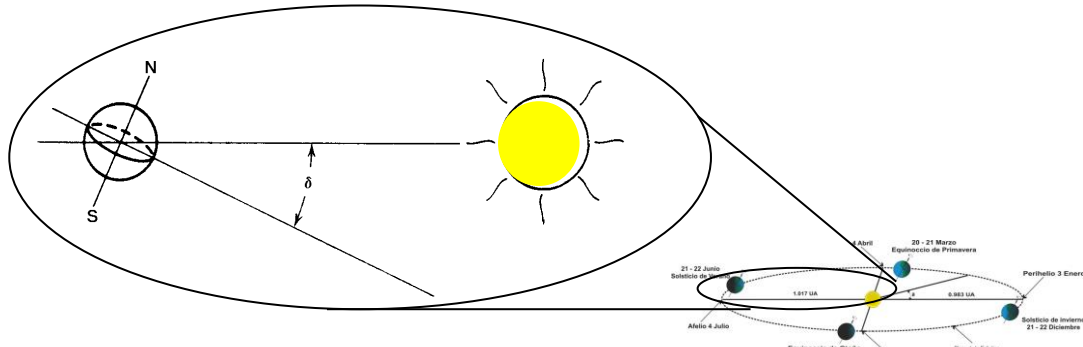


Figura 11. Declinación solar. (Fuente: Atlas, 2005).

Debido al movimiento de la tierra alrededor del Sol, el valor de la declinación solar varía cada día durante el año y puede calcularse mediante la siguiente fórmula, con un error máximo de 0,0006 rad.

$$\delta = (0,006918 - 0,399912 \cos a + 0,070257 \sin a - 0,006758 \cos 2a + 0,00097 \sin 2a - 0,002697 \cos 3a + 0,00148 \sin 3a) (180/\pi) \quad (4-4)$$

Donde a es la posición angular de la tierra en la órbita de giro alrededor del Sol, la cual se expresa en grados.

4.2 Variación de la radiación solar en el límite superior de la atmósfera

Como la distancia tierra-Sol cambia durante el año debido al movimiento de la tierra alrededor del Sol (translación), se origina una variación de la irradiancia solar incidente sobre una superficie normal al rayo solar en el límite superior de la atmósfera durante los meses del año como se ilustra la figura 12.

4.3 Sistemas de Coordenadas para determinar la posición del Sol

La posición del Sol en la esfera celeste se puede determinar mediante los sistemas de coordenadas horizontales y ecuatoriales.

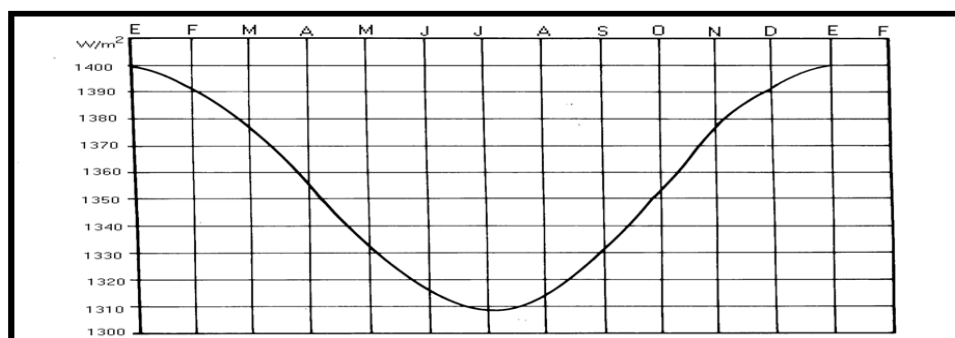


Figura 12. Variación de la radiación solar fuera de la atmósfera terrestre durante los meses del año. (Fuente: Atlas, 2005).

4.3.1 Sistema de coordenadas celestes horizontales

En este sistema, ilustrado en la figura 13(a), se determina la posición del Sol mediante los ángulos llamados azimut (Az) y la distancia zenital (Zo) o su complemento, la altura solar (h). La distancia zenital es la distancia angular entre el zenit del observador (Z) y la posición del Sol. Su complemento, la altura solar (h), es la distancia angular entre el horizonte del observador y el Sol. El azimut es la distancia angular, medida desde el sur (S) del lugar del observador y la proyección sobre el horizonte del meridiano del Sol que pasa por el zenit del observador, (Az es negativo hacia el este y positivo hacia el oeste, por lo tanto varía entre $-180 \leq Az \leq 180$). Estas coordenadas son de carácter local, ya que están ligadas a cada lugar de observación en particular.

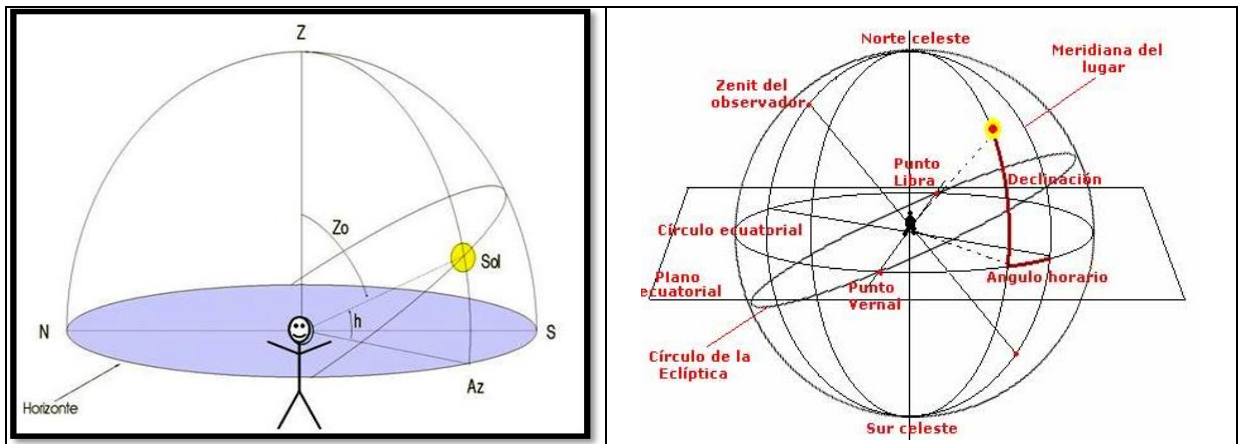


Figura 13. Sistema de coordenadas celestes: (a) horizontales y (b) ecuatoriales.

4.3.2 Coordenadas celestes ecuatoriales

También llamado sistema de coordenadas ecuatoriales locales, por usar como plano fundamental el plano ecuatorial de la Tierra. A diferencia de las coordenadas horizontales, las ecuatoriales no son de carácter local, puesto que están referidas a la esfera celeste. En el sistema ecuatorial, la posición del Sol está determinada por la declinación (δ , ver figuras 11 y 13(b)) y el ángulo horario (ω). El ángulo horario es el ángulo sobre el círculo ecuatorial, contado desde el punto de intersección del meridiano del observador (o lugar) con el círculo ecuatorial, hasta el círculo horario del Sol, en sentido horario. El origen del ángulo horario es el punto sur del observador, que es la intersección de la meridiana del lugar (pasa por el zenit del observador y por el polo norte celeste) con el círculo ecuatorial.

- Rango de medida de la declinación: de 0° a $+90^\circ$ hacia el polo norte celeste y de 0° a -90° hacia el polo sur celeste.
- Rango de medida del ángulo horario: se expresa en unidades de arco (grados) o en unidades de tiempo (horas), su conversión es: 1 hora = 15° . En el segundo caso el rango es de 0 a 24 horas en el sentido de las agujas del reloj.

4.3.3 Posición del Sol en el Triángulo astronómico

Combinando los dos sistemas de coordenadas, horizontales y ecuatoriales, se determina el triángulo astronómico en la esfera celeste que aparece en la figura 14, el cual está conformado por el polo norte, el zenit (Z) y el Sol, en otras palabras resulta de proyectar el meridiano del lugar (el que pasa por el zenit y los polos), el círculo horario (que pasa por los polos y el Sol) y la vertical del Sol (círculo que pasa por el zenit, el nadir y el Sol).

A partir de la posición del Sol en éste triángulo esférico, es posible determinar el ángulo de incidencia de la luz solar sobre una superficie horizontal o inclinada sobre la superficie terrestre por medio de las igualdades que se deducen del triángulo astronómico mediante el empleo de la trigonometría esférica.

$$\cos(90-h) = \cos(90-\phi) \cos(90-\delta) + \sin(90-\phi) \sin(90-\delta) \cos \omega \quad (4-5)$$

Donde **h** es la altura del Sol sobre el horizonte geográfico, **φ** es la latitud geográfica del lugar de observación, **δ** es la declinación del Sol para el día del año en que se realiza la observación y **ω** es el ángulo horario al momento de la medición de la radiación solar.

4.4 Altura del Sol (h)

Es el ángulo formado entre el plano del horizonte geográfico y la línea trayectoria del rayo solar que llega a una superficie normal a dicho rayo en la superficie terrestre (ver figura 13) y se determina con la siguiente ecuación:

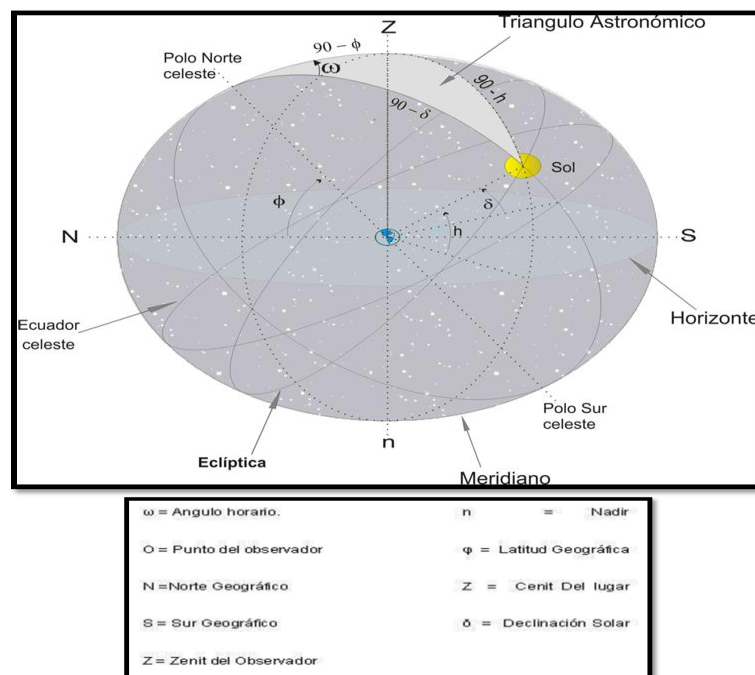


Figura 14. El triángulo astronómico. (Fuente: Atlas, 2005).

$$\sin h = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad (4-6)$$

De esta forma la altura del Sol queda en función de la latitud del lugar, la declinación del Sol y el ángulo horario al momento de medida de la radiación solar.

4.5 Duración astronómica del día (N)

Es la duración del día en horas desde la salida hasta la puesta del Sol. Se determina a partir de la ecuación (4-6), considerando $h=0^\circ$ y $h=180^\circ$ para la salida y puesta del Sol, respectivamente. Despejando el ángulo horario ω y de allí la duración del día. Cuando $h = 0$ ó 180 ;

$$\cos \omega = \frac{-\sin \phi \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta} \quad (4-7)$$

$$\cos \omega_s = -\tan \phi \cdot \tan \delta \quad (4-8)$$

La duración del día se determina duplicando el ángulo horario ω_s ("s" de salida del Sol) y dividiéndolo entre 15 para pasar de grados a horas.

$$N = \frac{2}{15} \arccos (-\tan \phi \tan \delta) \quad (4-9)$$

La ecuación (4-9) es válida si el valor absoluto de $(-\tan \phi \tan \delta) \leq 1$. Para las latitudes altas (mayores de 66.6°) donde dependiendo de la época del año, no se satisface esa condición, implica que los días pueden tener una duración igual a 24 horas, el Sol no se oculta, o igual a cero horas, el Sol se mantiene por debajo del horizonte dependiendo del día del año.

4.6 Dirección del haz de radiación

La relación geométrica entre un plano con una orientación dada relativa a la tierra y el haz de radiación solar, como se ilustra en la figura 15, puede ser determinada a partir de la ecuación:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos w - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \sin \delta \sin \phi \cos \beta \\ & + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos w + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin w \end{aligned} \quad (4-10)$$

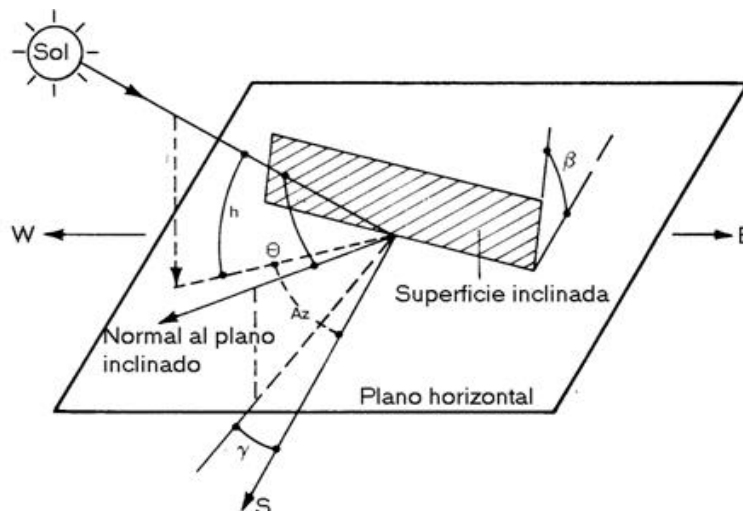


Figura 15. Dirección del haz de radiación solar. (Fuente: Atlas, 2005).

Donde:

β = ángulo entre el plano dado y la superficie horizontal $0 \leq \beta \leq 180^\circ$.

γ = ángulo azimut sobre la superficie, el cual se define en la sección de coordenadas celestes horizontales.

θ = ángulo de incidencia formado por el haz de radiación sobre una superficie y la normal a la superficie.

4.7 Angulo horario (ω)

La precisión con que se calcula este ángulo (cuya definición se presenta en la sección 4.3.2), depende de la exactitud con que se determine el paso del Sol sobre el lugar de observación, en el momento en que se esté midiendo la intensidad de la radiación solar y para esto es necesario conocer la hora real del paso del Sol (tiempo solar verdadero-TSV o LAT (local apparent time, en inglés)), que es diferente de la hora local del país.

El ángulo horario se calcula en magnitud tiempo a partir del medio día solar así:

$$\omega = 12 - \text{TSV} \quad (4-11)$$

El TSV se determina mediante la siguiente igualdad:

$$\text{TSV} = \text{TSM} + 4 (L_s - L_L) + E_T \quad (4-12)$$

Donde:

TSM = Tiempo solar medio, corresponde a la hora local

L_s = Longitud Geográfica del Meridiano de referencia del País (75°)

L_L = Longitud Geográfica del Meridiano del Lugar

E_T = Ecuación de Tiempo de la ecuación

El factor 4 de la ecuación es para convertir directamente a minutos la diferencia de las dos longitudes geográficas que son medidas en grados.

4.4.8 Ecuación del Tiempo (ET)

El tiempo solar verdadero se determina con base a la rotación de la tierra sobre su eje polar y alrededor del Sol. El giro sobre su eje polar se considera en 24 horas, pero en realidad no lo realiza en ese tiempo, sino que varía a lo largo del año por su desplazamiento elíptico alrededor del Sol. Las 24 horas de giro diario sería como si la tierra girara en forma circular alrededor del Sol y no en forma elíptica. A esta diferencia de tiempo de giro se conoce como ecuación del tiempo (E_T) y tiene una variación diaria hasta de 16 minutos. Spencer también formula una ecuación para calcular diariamente la E_T en términos de serie de Fourier:

$$(E_T) = (0,000075 + 0,001868 \text{ Cosa} - 0,032077 \text{ Sena} - 0,014615 \text{ Cos}2a - 0,04089 \text{ Sen}2a) (229,18) \quad (4-13)$$

5. CARACTERÍSTICAS DE LA RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar es la energía emitida por el Sol, que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas y se genera en las reacciones del hidrógeno en el núcleo del Sol por fusión nuclear y es emitida por la superficie solar. Esa energía es el motor que determina la dinámica de los procesos atmosféricos y el clima.

El Sol emite energía en forma de radiación de onda corta. Después de pasar por la atmósfera, donde sufre un proceso de debilitamiento por la difusión, reflexión en las nubes y de absorción por las moléculas de gases (como el ozono y el vapor de agua) y por partículas en suspensión, la radiación solar alcanza la superficie terrestre oceánica y continental que la refleja o la absorbe. La cantidad de radiación absorbida por la superficie es devuelta en dirección al espacio exterior en forma de radiación de onda larga, con lo cual se transmite calor a la atmósfera.

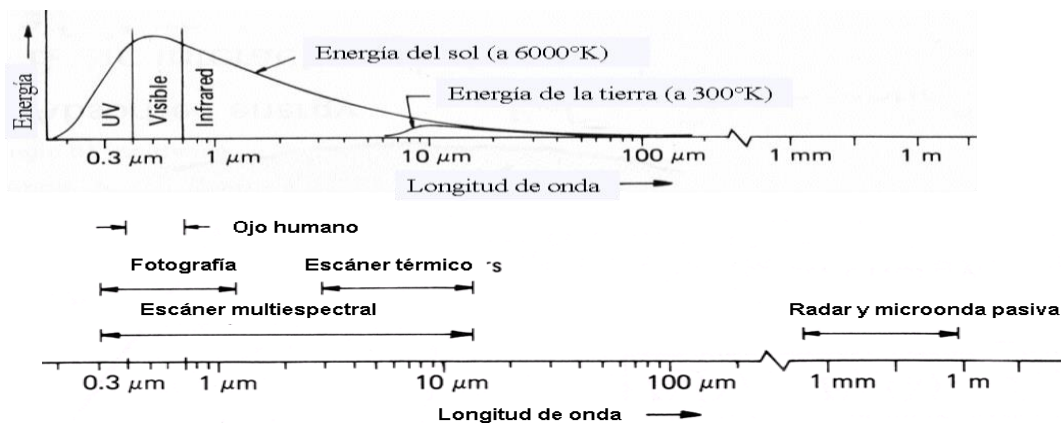


Figura 16. Energía radiada por el Sol y la tierra.

La radiación es emitida sobre un espectro de longitud de ondas, con una cantidad específica de energía para cada longitud de onda, la cual puede ser calculada usando la Ley de Planck:

$$E_{\lambda} = a / [\lambda^5 \{ e^{(b/\lambda \cdot T)} - 1 \}] \quad (4-14)$$

Donde, E_{λ} es la cantidad de energía ($\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$) emitida a una longitud de onda específica λ (μm : micrómetro equivalente a $1 \times 10^{-6}\text{m}$) por un cuerpo con una temperatura T (en grados Kelvin), con a y b como constantes. Asumiendo que el Sol es un cuerpo negro, por diferenciación de la ecuación es posible determinar la longitud de onda máxima de emisión de radiación procedente del Sol:

$$\lambda = 2897 / T \quad (4-15)$$

Esta ecuación es conocida como la Ley de Wien. Para una temperatura de 5.800 K (temperatura de la superficie solar) la longitud máxima de energía es aproximadamente $0,5 \mu\text{m}$. (ver figuras 16 y 17). Esta longitud de onda corresponde a radiación en la parte del espectro visible. Mientras que el máximo de energía radiante del Sol se produce en $\lambda \sim 0,5 \mu\text{m}$, para la Tierra se presenta en $\lambda \sim 10 \mu\text{m}$.

A través de la integración de la ecuación (4-14) resulta la ley de Stefan-Boltzmann, por medio de la cual, se puede determinar el total de energía emitida por el Sol:

$$E_{\text{Total}} = \sigma T^4 \quad (4-16)$$

donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann (con un valor de: $5,6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$). Resolviendo la ecuación 4-16 para una temperatura solar de 5.800 °K, la energía total de salida es de aproximadamente 64 millones W/m^2 , de la cual, la Tierra solo intercepta 1.367 W/m^2 .

En la figura 17, el área amarilla representa la solución ideal de la Ley de Plank de la radiación solar que llega al tope de la atmósfera, donde el punto más alto de la curva representa la longitud de onda con la mayor energía espectral ($0,5\mu\text{m}$, equivalente a 500nm) de acuerdo con la Ley de Wien y el área bajo la curva representa la cantidad total de energía recibida (1.367 W/m^2). Finalmente el área roja constituye el espectro de la radiación solar a nivel marino para condiciones de cielo claro, después de la absorción atmosférica debida a diferentes gases.

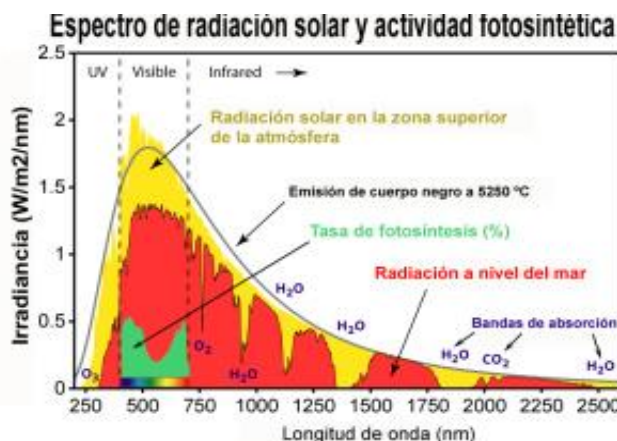


Figura 17. Espectro de radiación solar fuera de la atmósfera de la Tierra (área amarilla) y a nivel del mar para condiciones de cielo despejado (área roja). (Fuente: Wordpress).

El estudio del espectro de la radiación solar que llega a la superficie del suelo permite establecer que la radiación de longitud de onda menor que 200nm (que es la más peligrosa), es absorbida totalmente por la atmósfera. Esta energía es absorbida principalmente en la atmósfera por el oxígeno molecular (O_2), el ozono (O_3) y el vapor de agua (H_2O).

6. DISTRIBUCIÓN ESPECTRAL DE LA RADIACIÓN SOLAR

La energía solar llega en forma de radiación electromagnética, las cuales son ondas producidas por la oscilación o la aceleración de una carga eléctrica. Estas ondas no necesitan un medio material para propagarse, por lo que pueden atravesar el espacio y llegar a la Tierra desde el Sol y las estrellas. La longitud de onda (λ) y la frecuencia (μ) de las ondas electromagnéticas, relacionadas mediante la expresión $\lambda\mu = C$ (donde C es la velocidad de la luz), son importantes para determinar su energía, su poder de penetración y otras características. Independientemente de su frecuencia y longitud de onda, todas las ondas electromagnéticas se desplazan en el vacío a una velocidad de $C = 299.792\text{ km/s}$.

La longitud de onda de la luz es tan corta que suele expresarse en nanómetros (nm), que equivalen a una millonésima de metro, o una millonésima de milímetro o en micrómetros (μm) que equivalen a una millonésima de metro.

La radiación electromagnética se puede ordenar en un espectro en diferentes longitudes de onda, como se muestra en la figura 18, que se extiende desde longitudes de onda corta de billonésimas de metro (frecuencias muy altas), como los rayos gama, hasta longitudes de onda larga de muchos kilómetros (frecuencias muy bajas) como las ondas de radio. **El espectro electromagnético no tiene definidos límites superior ni inferior y la energía de una fracción diminuta de radiación, llamada fotón, es inversamente proporcional a su longitud de onda, entonces a menor longitud de onda mayor contenido energético.** Los fotones que se mueven a la velocidad de la luz, son emitidos o absorbidos por la materia.

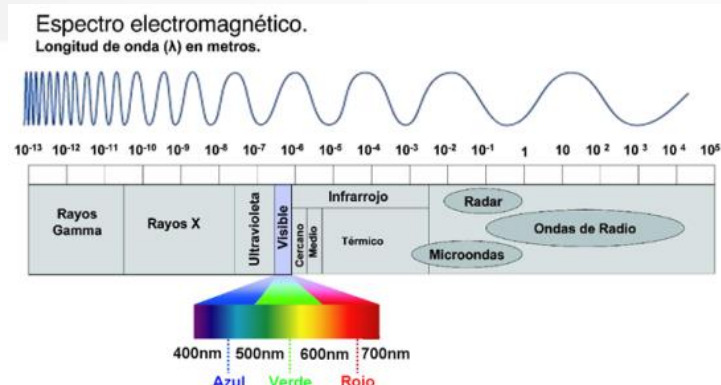


Figura 18. Espectro electromagnético.

El Sol emite energía principalmente en la banda del ultravioleta, visible y el infrarrojo cercano (ver figura 18), esta última está entre $0,70 \mu\text{m}$ y $4,0 \mu\text{m}$. Aproximadamente un 99% de la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra está contenida en la región entre $0,2$ a $4,0 \mu\text{m}$ y se denomina radiación de onda corta, mientras que la mayor parte de la radiación terrestre se encuentra en la región entre $5,0$ a $100,0 \mu\text{m}$.

La región visible (entre $0,4 \mu\text{m} < \lambda < 0,7 \mu\text{m}$) corresponde a la radiación que puede percibir la sensibilidad del ojo humano e incluye los colores: violeta ($0,42 \mu\text{m}$ ó 420 nm), azul ($0,48 \mu\text{m}$), verde ($0,52 \mu\text{m}$), amarillo ($0,57 \mu\text{m}$), naranja ($0,60 \mu\text{m}$) y rojo ($0,70 \mu\text{m}$). La luz de color violeta es más energética que la luz de color rojo, porque tiene una longitud de onda más pequeña. La radiación con las longitudes de onda más corta que la correspondiente a la luz de color violeta es denominada radiación ultravioleta, la cual está entre $0,10 \mu\text{m}$ y $0,42 \mu\text{m}$. Los distintos colores de luz, tienen en común el ser radiaciones electromagnéticas que se desplazan con la misma velocidad. Se diferencian en su frecuencia y longitud de onda. Las hojas y las plantas se ven verdes, porque reflejan energía en longitudes de onda verde del espectro, con $\lambda \approx 0,55 \mu\text{m}$. La radiación en el rango visible de espectro, en el caso de las plantas, se define como “radiación fotosintéticamente activa”, PAR (por sus siglas en inglés).

A cada región le corresponde una fracción de la energía total incidente en la parte superior de la atmósfera (denominada radiación solar extraterrestre) distribuida así: 7,2% al ultravioleta; 47,2% al visible y 45,6% al infrarrojo cercano.

7. CONSTANTE SOLAR

En el tope de la atmósfera, a una distancia promedio de $150 \times 10^6 \text{ Km}$ del Sol, el flujo de energía de onda corta interceptada por una superficie normal a la dirección del Sol, en vatios por metro cuadrado (W/m^2), es llamada *constante solar*. Este valor da una idea de los valores que se registran en el tope de la atmósfera y de los que finalmente llegan a la superficie de la tierra durante el día como consecuencia de las “pérdidas” de radiación por fenómenos como la reflexión, refracción y difracción (procesos de atenuación) durante su trayectoria.

La irradiancia solar que llega al tope de la atmósfera de la Tierra (I_0), también denominada como irradiación solar total – IST, puede ser calculada al asumir que el flujo solar es constante:

$$I_0 \times 4\pi R_{\text{es}}^2 = E_{(\text{Sol})} \times 4\pi R_{\text{s}}^2, \quad (4-17)$$

donde R_{es} es la distancia media entre la Tierra y el Sol (aprox. $1,5 \times 10^{11} \text{ m}$) y R_{s} es el radio aproximado del Sol (aprox. $7 \times 10^8 \text{ m}$).

La irradiancia de la radiación electromagnética del Sol (E_{Sol}) esta dada por:

$$E_{\text{Sol}} = dQ / dt / dA \quad (4-18)$$

Donde dQ / dt es el flujo radiante del Sol, el cual es cercano a $3,90 \times 10^{26}$ vatios.

$$E_{\text{Sol}} = \frac{3,90 \times 10^{26}}{4\pi (7 \times 10^8)^2} = 6,34 \times 10^7 \text{ W/m}^2 \quad (4-19)$$

Despejando se obtiene:

$$I_0 = 6,34 \times 10^7 (7 \times 10^8 / 1,5 \times 10^{11})^2 = 1380 \text{ W/m}^2 \quad (4-20)$$

Según el Centro de Referencia Radiométrica Mundial (World Radiometric Reference - WRR) del Centro Mundial de Radiación (World Radiation Center - WRC), la constante solar tiene un valor aproximado de:

$$\begin{aligned}
 I_0 &= 1.367 \text{ W/m}^2 \\
 &= 433,3 \text{ Btu/(ft}^2\text{*h)} \\
 &= 1,96 \text{ cal/(cm}^2\text{*min)}
 \end{aligned}$$

con una desviación estándar de $1,6 \text{ W/m}^2$ y una desviación máxima de $\pm 7 \text{ W/m}^2$.

Por otro lado, la constante tiene la siguiente variación:

$$I_{\text{Afelio}} = 1.308 \text{ W/m}^2$$

$$I_{\text{Perihelio}} = 1.398 \text{ W/m}^2$$

La figura 19 muestra la *constante solar* medida por satélites en W/m^2 durante el período 1978-2003. En esta figura se observa, que la constante varía con el tiempo, así como un leve aumento en los mínimos de la misma. También se aprecia el ciclo solar, en el cual cada 11 años se presenta un máximo en la constante.

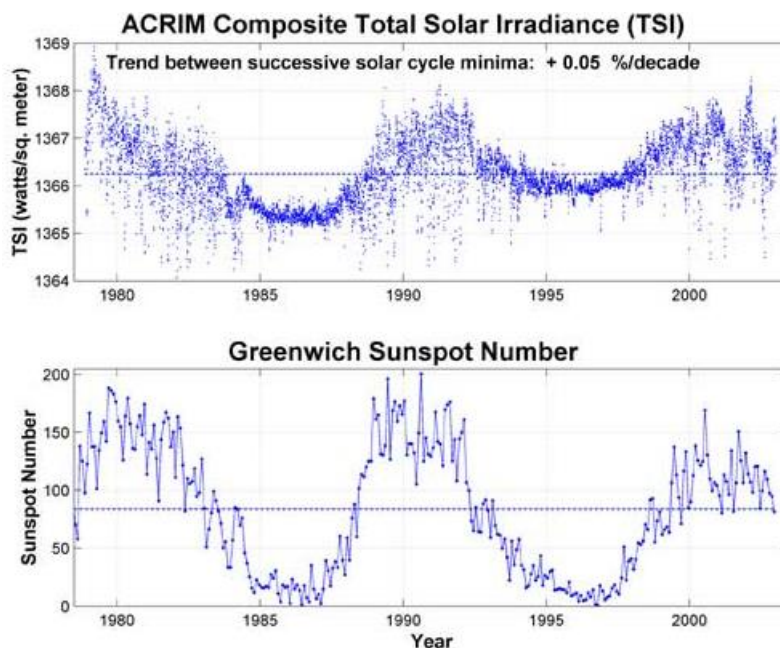


Figura 19. Valores de la constante solar medidos por medio de satélites. (Fuente: NASA)

8 ATENUACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar al pasar por la atmósfera sufre un proceso de debilitamiento por la dispersión (debida a los aerosoles), la reflexión (por las nubes) y la absorción (por las moléculas de gases y por partículas en suspensión), por lo tanto, la radiación solar que llega a la superficie terrestre (océano o continente) es menor a la del tope de la atmósfera. Esto depende de la longitud de onda de la energía transmitida y del tamaño y naturaleza de la sustancia que modifica la radiación. La superficie de la Tierra, suelos, océanos y también la atmósfera, absorbe energía solar y la vuelven a irradiar en forma de calor en todas las direcciones.

Los procesos de atenuación que sufre la radiación solar en su trayectoria hacia la tierra son:

8.1 Dispersión

La radiación solar viaja en línea recta, pero los gases y partículas en la atmósfera pueden desviar esta energía, lo que se llama dispersión. La dispersión ocurre cuando un fotón afecta a un obstáculo sin ser absorbido, cambiando solamente la dirección del recorrido de ese fotón. La dispersión depende de la longitud de onda, en el sentido de que cuanto más corta sea ésta, tanto mayor será la dispersión. Moléculas de gas con tamaños relativamente pequeños comparadas con la longitud de onda causan que la radiación incidente se disperse en todas las direcciones, hacia adelante y hacia atrás, fenómeno que es conocido como dispersión de Rayleigh. Aerosoles cuyos tamaños son comparables o exceden a las longitudes de onda de la radiación incidente, hacen que ésta no se disperse en todas las direcciones sino mayormente hacia adelante, fenómeno llamado dispersión de Mie. El proceso de la dispersión explica cómo una pieza sin luz solar está iluminada, le llega luz difusa o radiación difusa.



Figura 20. Dispersión, reflexión y absorción de la luz. (Fuente: ADR)

La dispersión de la luz es su descomposición en colores. Las longitudes de onda toman ángulos distintos y los colores se separan. Siguen el orden del arco iris: el color rojo tiene la longitud de onda más larga y el violeta la más corta.

Los gases de la atmósfera dispersan más efectivamente las longitudes de onda más cortas (violeta y azul) que en longitudes de onda más largas (naranja y rojo). Esto explica el color azul del cielo y los colores rojo y naranja del amanecer y atardecer. Salvo a la salida y a la puesta del Sol, todos los puntos del cielo son fuentes de difusión de luz azul para un observador ubicado en la superficie terrestre; al amanecer y en el crepúsculo, los rayos deben recorrer un camino más largo a través de la baja atmósfera; esto hace que casi toda la luz azul haya sido difundida antes de llegar al observador.

8.2 Reflexión (Albedo)

La capacidad de reflexión o fracción de la radiación reflejada por la superficie de la tierra o cualquier otra superficie se denomina Albedo. El albedo planetario es en promedio de un 30%. Esta energía se pierde y no interviene en el calentamiento de la atmósfera.

El albedo, relación entre la radiación reflejada y la radiación incidente sobre una superficie horizontal, se expresa en porcentaje así:

$$A\% = \frac{R}{H} \times 100 \quad (4-21)$$

A% = Albedo

R = Flujo de radiación reflejada

H = Flujo total incidente

El albedo es variable de un lugar a otro y de un instante a otro, depende de la cobertura nubosa, naturaleza de la superficie, inclinación de los rayos solares, partículas en el aire, etc. En general, las superficies oscuras y quebradas reflejan menos que las claras y lisas. Al aumentar la humedad del suelo, este absorbe mayor cantidad de radiación global.

El albedo del suelo en general está comprendido entre el 10% y el 30%, el barro húmedo baja su valor hasta un 5 %, en el caso de arena seca eleva su valor a un 40%. El albedo de los sembrados y bosques está entre 10 y 25% y la nieve reciente alcanza un valor de 80 a 90%. En el albedo del agua influye el grado de turbiedad; en el agua sucia el albedo aumenta con respecto al agua limpia.

Tabla 2. Albedo de algunas superficies comunes.

SUPERFICIE	ALBEDO %
Nieve fresca	80-90
Arena	20-40
Pasto	20-25
Bosque	5-10
Suelo seco	15-25
Barro húmedo	5
Agua (Sol cerca del cenit)	3-5
Agua (Sol cerca del horizonte)	50-80
Nube gruesa	70-80
Nube delgada	25-30
Tierra y atmósfera global	30

8.3 Absorción por moléculas de gases y partículas en suspensión

La absorción de energía por un determinado gas tiene lugar cuando la frecuencia de la radiación electromagnética es similar a la frecuencia vibracional molecular del gas. Cuando un gas absorbe energía, esta se transforma en movimiento molecular interno que produce un aumento de temperatura.

La atmósfera es un fluido constituido por diferentes tipos de gases y cada uno de ellos se comporta de manera diferente, de manera tal, que absorben la energía selectivamente para diferentes longitudes de onda y en algunos casos son transparentes para ciertos rangos del espectro. La atmósfera principalmente tiene bajo poder de absorción o es transparente en la parte visible del espectro, pero tiene un significativo poder de absorción de radiación ultravioleta o radiación de onda corta procedente del Sol y el principal responsable de este fenómeno es el

ozono, así mismo, la atmósfera tiene buena capacidad para absorber la radiación infrarroja o de onda larga procedente de la Tierra y los responsables en este caso son el vapor de agua, el dióxido de carbono y otros gases traza como el metano y el óxido nitroso.

Los gases que son buenos absorbedores de radiación solar son importantes en el calentamiento de la atmósfera, por ejemplo, la absorción de radiación solar por el ozono proporciona la energía que calienta la estratosfera y la mesosfera.

La absorción de radiación infrarroja procedente de la Tierra es importante en el balance energético de la atmósfera. Esta absorción por los gases traza, calienta la atmósfera, estimulándolos a emitir radiación de onda más larga. Parte de esta radiación es liberada al espacio, en niveles muy altos y otra parte es irradiada nuevamente a la Tierra. El efecto neto de este fenómeno permite que la Tierra almacene mas energía cerca de su superficie que la cantidad que podría almacenar si la Tierra no tuviera atmósfera, consecuentemente, la temperatura es más alta, del orden de 33°C más. Este proceso es conocido como **el efecto de invernadero natural**. Sin el efecto invernadero la temperatura promedio en la superficie sería aproximadamente de 18°C bajo cero y la vida en el planeta no sería posible. Consecuentemente, los gases en la atmósfera que absorben la radiación infrarroja procedente de la Tierra, son conocidos como gases de efecto invernadero, entre ellos se encuentran el dióxido de carbono, vapor de agua, óxido nitroso, metano y el ozono.

En la figura 21, se muestra cómo diversos gases en la atmósfera absorben diferentes longitudes de onda. Se observa que el nitrógeno es mal absorbedor de radiación solar; el oxígeno y el ozono son buenos absorbedores de radiación ultravioleta en $\lambda < 0,29 \mu\text{m}$, mientras que el vapor de agua y el dióxido de carbono son buenos absorbedores en el infrarrojo.

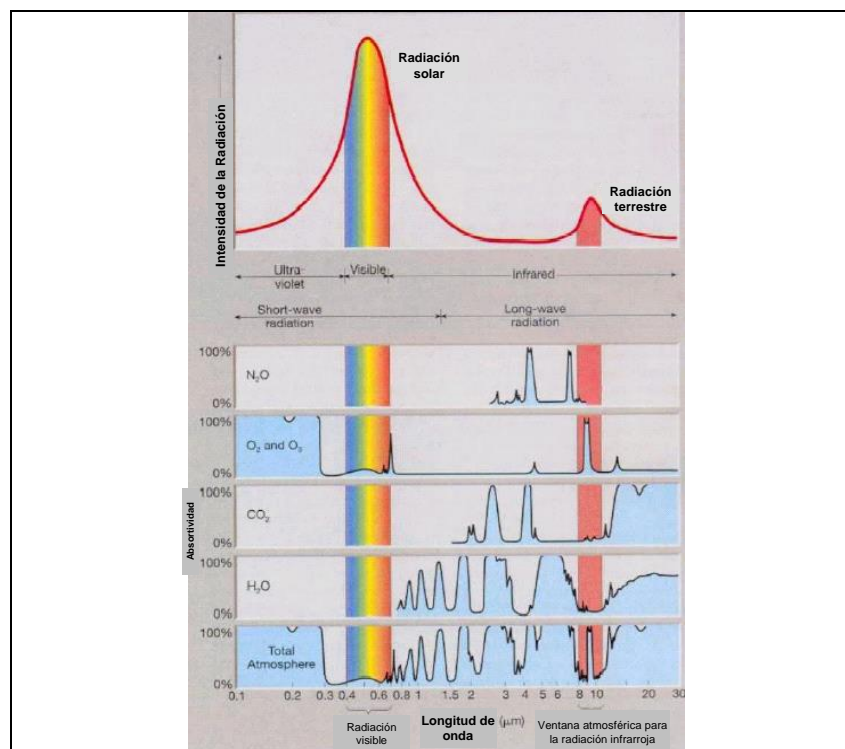


Figura 21. Absorción de radiación por diferentes gases de la atmósfera.

El vapor de agua absorbe aproximadamente cinco veces más radiación terrestre que todos los otros gases combinados, contribuyendo a elevar la temperatura de la baja troposfera, lugar donde se desarrolla la vida. En la banda entre 8 y 11 μm se presenta la “ventana atmosférica”, debido a

que en ese rango de longitud de onda la atmósfera, especialmente el vapor de agua y el dióxido de carbono, no absorbe radiación, la cual se escapa al espacio exterior.

Para la atmósfera total ningún gas es un efectivo absorbedor de radiación en longitudes de onda entre 0,3 y 0,7 μm , por lo que se tiene un vacío en la región de la luz visible, que corresponde a una gran fracción de la radiación solar. Esto explica porqué la radiación visible llega a la Tierra y se dice que la atmósfera es transparente a este tipo de radiación.

9. RADIACIÓN INCIDENTE SOBRE LA SUPERFICIE TERRESTRE

Es muy grande la cantidad de energía solar que fluye hacia y desde la Tierra y la atmósfera. Una comparación que permite apreciar la cantidad de energía solar que cada año incide sobre la Tierra es que equivale a cerca de 160 veces la energía de las reservas mundiales de energía fósil o que es similar a más de 15.000 veces la energía anual usada de los combustibles fósiles y nucleares y de las plantas hidráulicas.

Una aproximación de la cantidad de energía incidente en la Tierra y de cómo se transforma en la atmósfera y la superficie terrestre se puede establecer de la siguiente manera: de la radiación total incidente, 173.000 Teravatios, el 30% es reflejado al espacio exterior. La mayor parte del 70% restante calienta la superficie terrestre, la atmósfera y los océanos (47%) o se absorbe en la evaporación de agua (23%). Relativamente, muy poca energía es usada y dirigida al viento y las olas o para ser absorbida por las plantas en la fotosíntesis. En realidad prácticamente toda la energía es radiada al espacio exterior en forma de radiación infrarroja.

La disponibilidad de energía procedente del Sol depende de la localización geográfica de un punto en la Tierra (latitud, longitud, elevación), además de factores astronómicos como la época del año y la duración del día. Todos estos factores pueden ser determinados con menor o mayor grado de exactitud para estimar la cantidad de energía solar disponible. Sin embargo, el factor que afecta mayormente su disponibilidad efectiva son las nubes y otras condiciones meteorológicas (como la presencia de aerosoles), factores que varían según el lugar y el momento del día.

Los parámetros fundamentales que inciden en la cantidad de radiación disponible en la superficie terrestre son:

- La transparencia de la atmósfera, caracterizada por su “coeficiente de extinción” o por su “transmisividad”.
- La nubosidad
- El día del año y su duración astronómica
- La elevación del Sol en el horizonte
- La “heliofanía”, definida como el tiempo en horas durante el cual el Sol tiene un brillo solar efectivo.

El efecto de atenuación de la radiación solar al atravesar la atmósfera se muestra en la figura 22. **La radiación que finalmente llega a la superficie de la tierra se clasifica en radiación directa, difusa y global.**

9.1 Radiación directa (H_b)

Es la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra en forma de rayos provenientes del Sol sin haber sufrido difusión, ni reflexión alguna. Esta radiación llega a la superficie de la Tierra, sin cambios de dirección. Se puede calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$H_b = I' = I \sen h \quad (4-22)$$

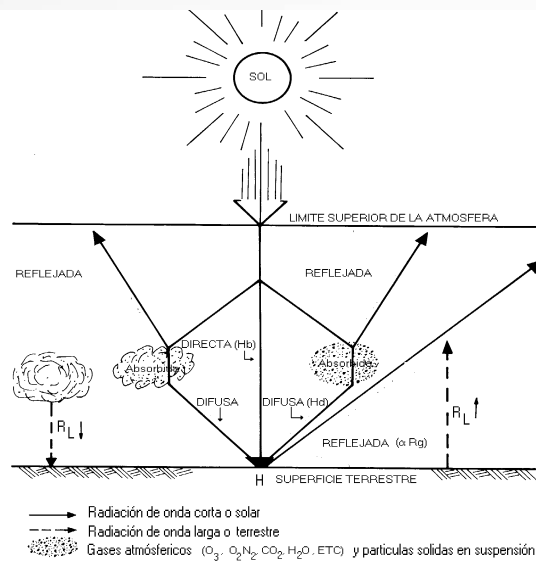


Figura 22. Atenuación de la radiación solar por la atmósfera terrestre.

Donde I' es la componente vertical de la radiación solar directa sobre una superficie horizontal, h la altura del Sol sobre el horizonte e I es la intensidad de la radiación directa sobre la superficie normal a los rayos solares. Es evidente que I es mayor que I' y son iguales solamente cuando el Sol se encuentra en el Cenit (ver figura 23).

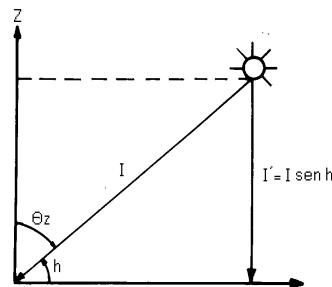


Figura 23. Componente directa de la radiación Sol. Fuente (IDEAM)

Sobre la superficie de la tierra, el flujo de la radiación directa depende de los siguientes factores: la constante solar, la altura del Sol sobre el horizonte (h) y la transparencia atmosférica en presencia de gases absorbentes, nubes y niebla.

9.2 Radiación difusa (H_d)

Es la componente de la radiación solar que al encontrar pequeñas partículas en suspensión en la atmósfera en su camino hacia la tierra e interactuar con las nubes, es difundida en todas las direcciones. También es definida como la cantidad de energía solar que incide sobre una superficie horizontal desde todos los lugares de la atmósfera diferente de la radiación solar directa. Cuando no hay nubes, la radiación difusa se produce por medio del proceso de difusión a través de partículas atmosféricas.

La radiación solar difusa diaria es la cantidad de radiación difusa entre las seis de la mañana y las seis de la tarde y sus valores oscilan entre 300 y 5.500 Wh/m^2 al día.

Sobre la superficie de la tierra la radiación difusa depende de:

- a) La altura del Sol sobre el horizonte. A mayor altura, mayor es el flujo de radiación difusa.
- b) Cantidad de partículas en la atmósfera. A mayor cantidad de partículas, mayor es la componente difusa; por consiguiente aumenta con la contaminación.
- c) Nubosidad. Aumenta con la presencia de capas de nubes blancas relativamente delgadas.
- d) Altura sobre el nivel del mar. Al aumentar la altura, el aporte de la radiación difusa es menor debido a que disminuye el espesor de las capas difusoras en la atmósfera.

Estudios en el Reino Unido han confirmado que las plantas son más eficientes bajo la radiación difusa, ya que esta tiene efectos positivos en la fotosíntesis de las plantas, proceso por el cual absorben dióxido carbono.

9.3 Radiación global (H)

La radiación global es toda la radiación que llega a la tierra y que se mide sobre una superficie horizontal en un ángulo de 180 grados, resultado de la componente vertical de la radiación directa más la radiación difusa. El aporte de cada componente a la radiación global, varía con la altura del Sol, la transparencia de la atmósfera y la nubosidad.

Su evaluación se efectúa por el flujo de esta energía por unidad de área y de tiempo sobre la superficie horizontal expuesta al Sol y sin ningún tipo de sombra; de esta manera, si llamamos H al flujo de radiación global; se tiene que:

$$H = I \cos h + H_d = H_b + H_d \quad (4-23)$$

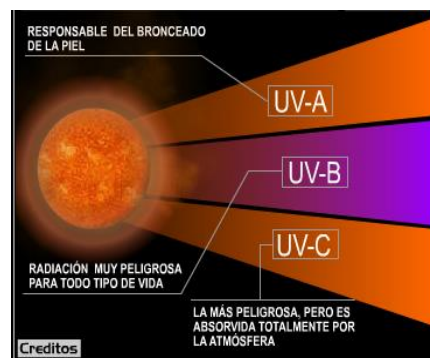
La radiación global diaria es el total de la energía solar en el día y sus valores típicos están dentro del rango de 1 a 35 MJ/m² (megajoules por metro cuadrado), es decir entre 300 Wh/m² y 9500 Wh/m².

10 RADIACIÓN ULTRAVIOLETA

A comienzo del siglo XIX, Johannes Ritter descubrió que el Sol, además de luz visible, emite una radiación "invisible" de longitud de onda más corta que el azul y el violeta. Esa banda recibió el nombre de "ultravioleta". El Sol emite una gran cantidad de energía a la Tierra, de la cual sólo entre un 6% a 7% corresponde a la radiación ultravioleta (UV). Esta radiación es una forma de energía radiante que cubre el rango de longitudes de onda entre los 100 y los 400 nanómetros y usualmente es clasificada en tres categorías (constituida por longitudes de onda ascendentes que van desde el UV-C, UV-B y la UV-A) de acuerdo con la longitud de onda (mientras más corta sea la longitud de onda de la radiación UV, biológicamente es más perjudicial):

UV-A entre 320 y 400 nm
UV-B entre 280 y 320 nm
UV-C entre 100 y 280 nm

La radiación solar viaja a través de la atmósfera terrestre antes de llegar a la superficie y en este recorrido toda la radiación UV-C y el 90% de la UV-B es absorbida por gases como el ozono, vapor de agua, oxígeno y dióxido de carbono, mientras que, la radiación UV-A es débilmente absorbida.



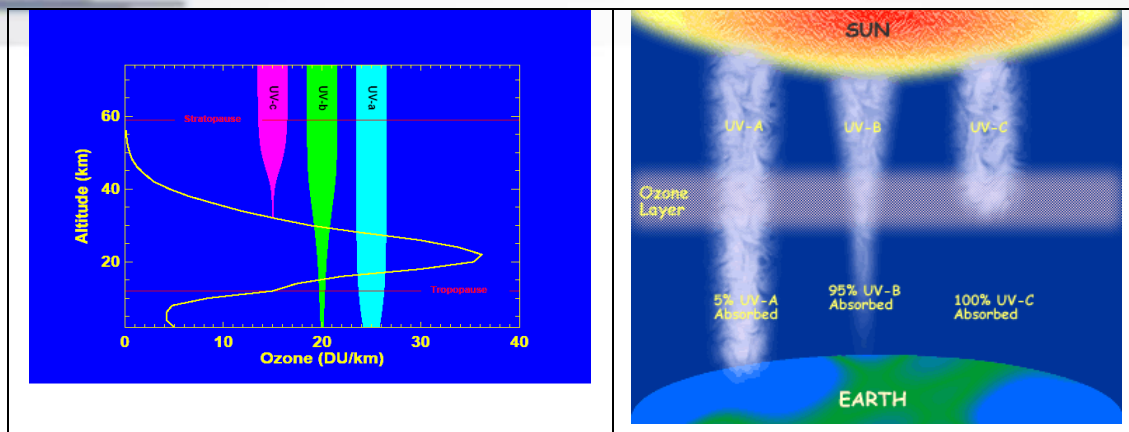


Figura 24. Absorción de la radiación UV en la atmósfera. Fuente (CCPO)

Debido a lo anterior, la radiación UV que alcanza la superficie de la tierra está compuesta en gran parte por la radiación UV-A (95%) y en menor grado por la UV-B (5%). La radiación UV que alcanza la troposfera es el motor de todos los procesos fotoquímicos en las capas bajas de la atmósfera de la Tierra.

Las longitudes de onda más largas, la UV-A y UV-B se manifiestan en múltiples implicaciones sobre los procesos biológicos del planeta. En dosis apropiadas, estas longitudes de onda benefician ciertas funciones de los organismos vivos, pero en dosis excesivas y acumulativas sus consecuencias pueden ser muy perjudiciales.

10.1 Tipos de radiación UV y sus efectos en la salud

En el ser humano, una exposición prolongada a la radiación solar UV puede producir efectos agudos y crónicos en la salud de la piel, los ojos y el sistema inmunitario. Las quemaduras solares son los efectos agudos más conocidos de la exposición excesiva a la radiación UV; a largo plazo, este daño acumulativo produce cambios a nivel celular en cada una de las diferentes capas de la piel, del tejido fibroso y de los vasos sanguíneos, que se puede traducir más tarde en el envejecimiento prematuro de la piel o en el peor de los casos en un cáncer, que se manifiesta con tumores, manchas, úlceras, lunares o masas. La radiación UV puede producir también reacciones oculares de tipo inflamatorio, como la queratitis actínica. Los efectos biológicos por la sobre exposición a la radiación UV, están asociados a graves daños en el fitoplancton marino y en los sistemas vegetales por la alteración de las funciones clorofílicas en estos últimos y por ende disminución de las cosechas.

Existe una relación entre la energía del fotón UV y las energías de ligadura de muchas moléculas químicas y biológicas, por ejemplo, la radiación UV de longitud de onda menor de 240 nm rompe el enlace de la molécula de oxígeno (O_2) que posteriormente forma el ozono estratosférico; longitudes de onda cercanas a los 250 nm incrementan la absorción de UV por parte del ADN y otras moléculas intranucleares, es por esto que la radiación de 250 nm es usada como germicida.

10.1.1. Radiación UV-A

La radiación UV-A es la forma menos dañina de la radiación ultravioleta y es la que llega a la Tierra en mayores cantidades, siendo la continuación de la radiación visible, pero presenta un menor peligro por ser menos energética y además es responsable del bronceado de la piel. Los rayos UV-A penetran en el tejido conectivo y causan lesiones crónicas inducidas por la luz, como el envejecimiento prematuro de la piel y su oscurecimiento. También son responsables de la formación de radicales libres y de reacciones tanto fototóxicas como fotoalérgicas (tales como las

alergias solares denominadas fotodermatitis poliforme). Los radicales libres son compuestos químicos con electrones libres, que poseen una reactividad elevada y pueden dañar las células de la epidermis y la dermis. La radiación UV-A también puede dañar pinturas y plásticos que se encuentren a la intemperie.

10.1.2. Radiación UV-B

La radiación UV-B, que llega a la superficie de la Tierra es potencialmente dañina, ya que reduce el crecimiento de las plantas y la exposición humana prolongada a este tipo de radiación puede causar daños a la salud, tales como:

- Daños en la piel tan leves como una simple quemadura (eritema solar) o de tal gravedad como mutaciones en el ADN de las células cutáneas que pueden derivar en el cáncer de piel, el cual puede aparecer muchos años después de la exposición excesiva al Sol, ya que este tipo de radiación es absorbida por el ADN dérmico penetrando en las capas celulares más profundas de la epidermis. Cada año, se producen en el mundo entre 2 y 3 millones de casos de cáncer de piel no melánico y aproximadamente 132.000 casos de cáncer de piel melánico. Los cánceres de piel no melánicos se pueden extirpar y rara vez son mortales, pero los melanomas malignos contribuyen sustancialmente a la mortalidad en las poblaciones de piel clara. Este último tipo de cáncer está asociado a los lunares y es el tumor más letal de la piel porque posee una alta capacidad metastásica, es decir que estas células cancerígenas se pueden diseminar por otras partes del organismo. La radiación UV-B que es bastante energética puede causar daños celulares de carácter degenerativo, debido a que puede romper los enlaces de las moléculas del ADN, las cuales son portadoras moleculares de nuestro codificador genético.

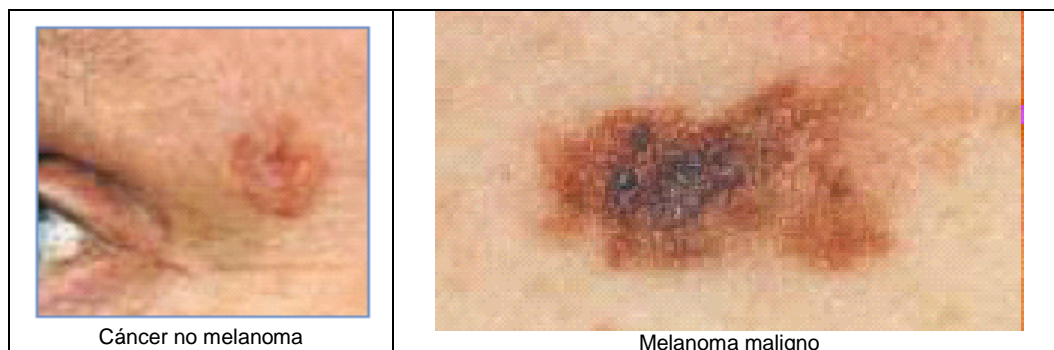


Figura 25. Efectos de la radiación UV sobre la salud (fuente: OMS, OMM, PNUMA y el ICNIRP)

- Reducción de la eficiencia del sistema inmunológico, aumentando el riesgo de infecciones y disminuyendo la eficacia de las vacunas, ya que, la radiación UV-B actúa como un agente inmunosupresor local.
- Cataratas (producidas cuando el cristalino, el cual enfoca la luz hacia la retina, se nubla). Entre 12 y 15 millones de personas padecen de ceguera causada por cataratas. Según estimaciones de la OMS, hasta un 20% de estos casos de ceguera **pueden haber sido causados o haberse agravado por la exposición al Sol, especialmente en zonas cercanas al ecuador.**
- La exposición constante al Sol produce también pterigios (crecimiento de tejido fibroso sobre la cornea) y lesiones de retina con pérdida visual permanente.
- Genera rugosidades en la piel, manchas claras y oscuras (llamadas hipopigmentaciones o hiperpigmentaciones) y daños a otras formas de vida.
- Por último, la radiación UV-B también produce daños a materiales y equipos que se encuentren a la intemperie.
- Puede provocar daños en la piel y en los ojos de los animales, además de cambios en los procesos de producción de los vegetales, entre otros efectos.

10.1.3. Radiación UV-C

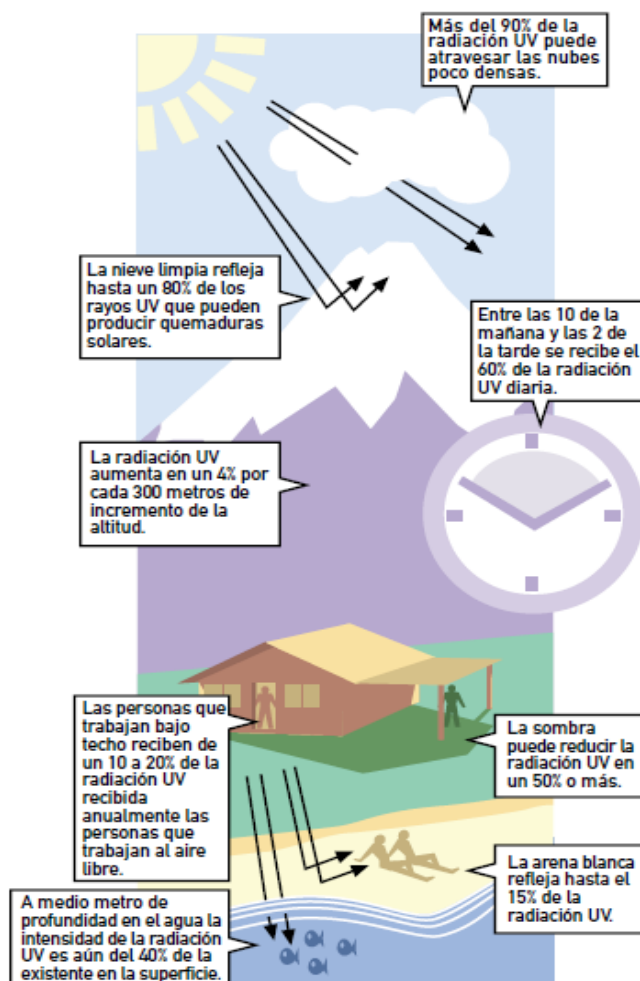
Los rayos UV-C son la forma más dañina de toda la gama de rayos ultravioleta porque es muy energética, pero esta radiación es absorbida por el oxígeno y el ozono en la estratosfera y nunca llega a la superficie terrestre.

A pesar de los efectos negativos que produce la radiación UV, cantidades pequeñas de esta radiación son beneficiosas para las personas y esenciales en la síntesis dérmica de la vitamina D; la radiación UV también se utiliza, bajo supervisión médica, para tratar varias enfermedades como el raquitismo, la psoriasis y el eczema.

Finalmente, se considera que la conducta de las personas con respecto al Sol es la causa principal del aumento de las tasas de cáncer de piel en las últimas décadas. El incremento de las actividades al aire libre y los nuevos hábitos al tomar el Sol ocasionan una excesiva exposición a la radiación UV. A muchas personas les parece normal tomar el Sol de forma intensa y consideran que el bronceado es un símbolo de belleza y buena salud.

10.2 Factores que influyen en los niveles de radiación UV

Los niveles de radiación UV en la superficie dependen de varios factores como son: la posición del Sol, la altitud, la latitud, el cubrimiento de las nubes, la cantidad de ozono en la atmósfera y la reflexión terrestre.



Los niveles de radiación UV varían durante el día y a lo largo del año, presentándose los mayores niveles en el día cuando el Sol se encuentra en su máxima elevación, esto es entre las 10 a.m. y las 2 p.m. (cerca del 60% de la radiación UV es recibida a estas horas), mientras que, cuando el ángulo del Sol está más cercano al horizonte llega menos radiación UV a la superficie de la Tierra debido a que atraviesa una mayor distancia en la atmósfera y encuentra más moléculas de ozono, dando lugar a una mayor absorción. En zonas diferentes a los trópicos los máximos niveles se presentan en los meses de verano alrededor del mediodía. En los trópicos, los mayores niveles de radiación en el tope de atmósfera, se presentan generalmente a principios de año, durante el perihelio (cuando la Tierra está más cerca al Sol) y los más bajos a mitad del año durante el afelio (cuando la Tierra está más alejada del Sol).

La radiación UV varía de acuerdo con la ubicación geográfica; sobre la zona ecuatorial (como es el caso de Colombia) los rayos solares caen más directamente que en las latitudes medias y la radiación UV resulta ser más intensa en esa área.

Figura 26. Factores que influyen en los niveles de radiación UV. (Fuente: OMS, OMM, PNUMA y el ICNIRP).

La altitud también determina la cantidad de radiación UV que se recibe, debido a que en zonas de alta montaña es más delgada la capa atmosférica que deben recorrer los rayos solares, de manera que a mayor altitud mayor radiación UV. En promedio, por cada 1000 metros de incremento de la altitud, la radiación UV aumenta entre un 10% a un 12%.

Las nubes pueden tener un impacto importante en la cantidad de radiación UV que recibe la superficie terrestre, generalmente las nubes densas bloquean más UV que una nube delgada. La cobertura nubosa afecta la cantidad de radiación UV que llega a la superficie terrestre, ya que las gotas de agua y los cristales de hielo, actúan como excelentes difusores de radiación UV, mediante el fenómeno conocido como difusión Mie.

La contaminación trabaja en forma similar que las nubes, ya que la contaminación urbana reduce la cantidad de radiación UV que llega a la superficie de la tierra.

El nivel de radiación UV que llega a la superficie de un lugar, está inversamente relacionado con la cantidad de ozono total en la atmósfera (especialmente en la región entre los 18 y los 40 km de altura, zona en la que se ubica la capa de ozono); a menor cantidad de ozono mayor radiación UV llega a la superficie. Por ello, las mayores cantidades de radiación UV se reciben en aquellas regiones donde su contenido de ozono es menor. La zona con menor contenido de ozono total a nivel mundial, es la zona tropical que comprende amplios sectores del norte y centro de Suramérica, el Atlántico tropical y el centro de África, donde se registran promedios por debajo de 240 U.D.. Debido a lo anterior, estas zonas, donde está incluida Colombia, están expuestas a altos niveles de radiación ultravioleta en superficie durante todo el año.

La radiación UV reflejada puede producir los mismos efectos que la que llega a la superficie. La nieve es la superficie que más refleja radiación UV, alcanzando hasta un 80%, mientras que el concreto refleja hasta un 12%, la arena seca de playa el 15% y el agua de mar el 25%.

10.3 El Índice UV

El índice UV (IUV) es una medición sencilla de la intensidad de la radiación ultravioleta en la superficie de la Tierra. Se ha desarrollado como un indicador que asocia la intensidad de la radiación solar ultravioleta (principalmente la UV-B) incidente sobre la superficie de la tierra, con posibles daños en la piel humana y es una medida de orientación dirigida a promover en la población una exposición saludable al Sol, ya que ésta es necesaria para diversos procesos biológicos del organismo humano. Este indicador alcanza los niveles más altos alrededor del medio día y cuanto más alto, mayor es la probabilidad de lesiones cutáneas y oculares.

El índice UV indica la intensidad de la radiación UV-B en una escala del 1 al 11+, (encontrándose valores particulares entre 18 a 20, generados especialmente en los trópicos, a grandes altitudes), con las categorías de exposición que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Categoría de exposición a la radiación ultravioleta

CATEGORÍA DE EXPOSICIÓN	INTERVALO DE VALORES DEL IUV
BAJA	< 2
MODERADA	3 A 5
ALTA	6 A 7
MUY ALTA	8 A 10
EXTREMADAMENTE ALTA	11+

Fuente: Índice UV solar mundial, Guía práctica. OMS, OMM, PNUMA y el ICNIRP. 2003

La piel humana se puede dividir en 6 tipos, de acuerdo a su sensibilidad a la radiación ultravioleta (Tabla 4). Teniendo en cuenta, que más del 90% de los cánceres de piel no melánicos se

producen en los fototipos I y II, los mensajes de protección básicos asociados con el IUV deben dirigirse a las personas de piel clara más propensas a las quemaduras (OMS, 2003).

Tabla 4. Clasificación de tipos de piel

Fototipo de piel	Color de piel	Sensibilidad a la radiación	Descripción
I	Blanca (deficiente en melanina)	Muy sensible	Siempre se quema con facilidad tras la exposición al Sol, raramente se broncea.
II	Blanca (deficiente en melanina)	Muy Sensible	Habitualmente se quema tras la exposición al Sol, algunas veces se broncea.
III	Blanca (con melanina suficiente)	Sensible	Algunas veces se quema tras la exposición al Sol, habitualmente se broncea de manera gradual y uniforme, (café claro).
IV	Café Clara (con melanina suficiente)	Moderadamente sensible	Raramente se quema tras la exposición al Sol, siempre se broncea bien. (café moderado).
V	Café (con protección melanica)	Mínimamente sensible	Rara vez se quema. Se broncea intensamente (café oscuro).
VI	Café oscuro o negro (con protección melanica)	Insensible o mínimamente sensible	Nunca se quema. Se broncea intensamente (café oscuro o negro).

Adaptado del documento: Índice UV solar mundial, Guía práctica. OMS, OMM, PNUMA y el ICNIRP. 2003

Los niños, particularmente sensibles a la radiación UV, requieren una protección especial. Aunque las personas de piel oscura tienen menor incidencia de cáncer de piel, también son sensibles a los efectos nocivos de la radiación UV, especialmente a los que afectan los ojos y el sistema inmunológico.

10.3.1 Presentación y comunicación del Índice UV

El IUV debe dirigirse especialmente a los grupos de población vulnerables y con exposición alta, como los niños y los turistas y debe servir para informar a la población sobre los diversos efectos de la radiación UV sobre la salud, como las quemaduras solares, el cáncer y el envejecimiento de la piel o las alteraciones oculares y del sistema inmunitario. Se debe destacar que los efectos adversos para la salud debidos a la exposición de la radiación UV son acumulativos y que la exposición en la vida diaria puede ser tan importante como la que se produce durante las vacaciones en climas soleados.

Al comunicar el IUV, se pone el máximo énfasis en la intensidad máxima de la radiación UV en un día determinado, ya sea como categoría de exposición, el valor o intervalo de valores del IUV o ambos, que se produce durante el periodo de cuatro horas en torno al mediodía solar.

Una de las formas de hacer público el índice IUV es a través de la presentación de informes en las noticias y los boletines del pronóstico del tiempo, mejorando el entendimiento del concepto del índice por parte de las personas. El programa INTERSUN de la OMS ha desarrollado un paquete de gráficas estandarizadas que incluyen el logo IUV, un color internacional para diferentes valores del IUV y la escogencia de gráficas listas para el reporte del IUV y del mensaje de protección (ver figura 27 y la tabla 5).

La presentación gráfica normalizada del IUV fomenta la coherencia en la información sobre el índice en las noticias y los reportes del tiempo y sirve para mejorar la comprensión por parte de la población. La existencia de materiales elaborados previamente (graficas y mensajes) para informar sobre el índice, facilita su adopción por los medios de comunicación.



Figura 27. Sistema de protección solar con mensajes sencillos y fáciles de recordar. (Fuente: OMS, OMM, PNUMA y el ICNIRP).

Tabla 5. Protección solar recomendada.

Índice UV	Protección recomendada	Factor de protección solar (FPS) indicado	
		Piel clara	Piel oscura
<	Ninguna	15	8
-		Se puede usar un FPS de 25 para un índice entre 3 y 5 y de 30 para un índice de 6 y 7.	Se puede usar un FPS de 15 para un índice entre 3 y 5 y de 25 para un índice de 6 y 7.
+		50+	Se puede usar un FPS de 30 para un índice entre 8 y 10 y de 50+ para un índice superior a 11.

Fuente: Índice UV solar mundial, Guía práctica. OMS, OMM, PNUMA y el ICNIRP. 2003 y tutiempo.net para el FPS

El conjunto de pictogramas puede descargarse del sitio de Internet del Proyecto Internacional de la OMS sobre Radiación UV (<http://www.who.int/uv/>), Intersun, donde se encuentran los códigos de colores para los diferentes valores del IUV (ver figura 28), pictogramas de información sobre el IUV (ver figura 29) y los pictogramas de protección solar (ver tabla 5). En esta tabla también se puede apreciar el factor de protección solar indicado para cada rango del índice UV.

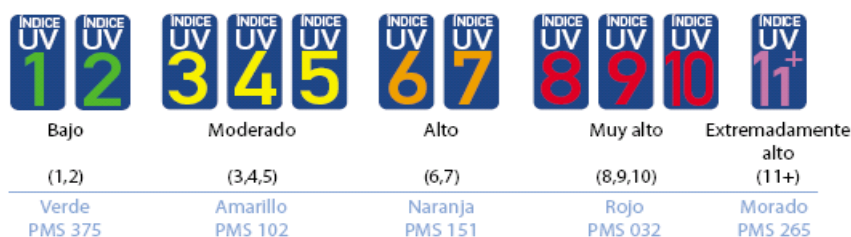


Figura 28. Código internacional de colores. (Fuente: OMS, OMM, PNUMA y el ICNIRP).

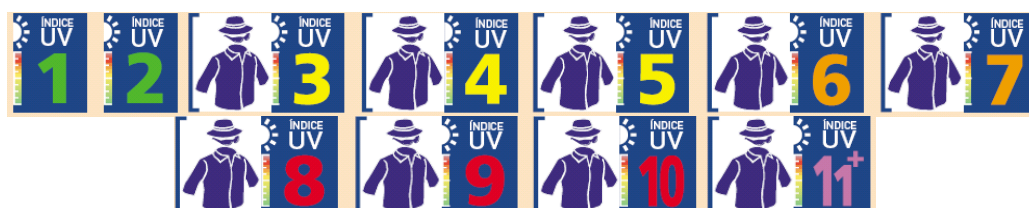


Figura 29. Pictogramas relativos al índice UV. (Fuente: OMS, OMM, PNUMA y el ICNIRP).

En el marco de la presentación del IUV, también pueden utilizarse recomendaciones adicionales para corregir falsas creencias habituales sobre la radiación UV y sus efectos sobre la salud humana, tal como se muestra en la tabla 6.

Por último, no se recomienda informar de los tiempos de exposición sin riesgo de quemadura, ya que la población tiende a interpretar que existe un tiempo de exposición seguro al Sol sin protección. En consecuencia, cuando se relacionan los valores del IUV con “tiempos de exposición sin riesgo de quemarse” o con “tiempos de bronceado seguro” se transmite un mensaje equivocado a la población. El IUV no debe dar a entender que puede prolongarse la exposición.

Tabla 6. Peligros de la radiación UV. Mitos y realidades.

FALSO	VERDADERO
El bronceado es saludable.	El bronceado es una forma de defensa del organismo contra daños adicionales por la radiación UV.
El bronceado te protege del sol.	Un bronceado intenso en personas de piel clara sólo ofrece una protección escasa, equivalente a un FPS de alrededor de 4.
En días nublados no te quemas.	Hasta el 80% de la radiación UV solar puede atravesar una nubosidad poco densa. La neblina de la atmósfera puede incluso aumentar la exposición a la radiación UV.
Estando en el agua no te quemas.	El agua proporciona una protección mínima contra la radiación UV y los reflejos del agua pueden aumentar la exposición.
Durante el invierno, la radiación UV no es peligrosa.	La radiación UV es generalmente menor durante los meses de invierno, pero la reflexión en la nieve puede duplicar la exposición total, especialmente a altitudes elevadas. Sea particularmente precavido a comienzos de la primavera, cuando las temperaturas son bajas pero los rayos del sol son más fuertes de lo que se podría esperar.
Las cremas protectoras permiten tomar el sol mucho más tiempo.	Las cremas de protección solar no deben utilizarse para aumentar el tiempo de exposición al sol, sino para aumentar la protección cuando la exposición es inevitable. La protección que proporcionan depende en gran medida de si se aplican correctamente.
Si realizas descansos periódicos al tomar el sol no te quemas.	La exposición a la radiación UV se acumula a lo largo del día.
Si uno no siente el calor de los rayos del sol no se quemará.	Las quemaduras solares se deben a la exposición a rayos UV imperceptibles. El efecto térmico se debe a la radiación infrarroja del sol y no a la radiación UV.

Fuente: Índice UV solar mundial, Guía práctica. OMS, OMM, PNUMA y el ICNIRP. 2003

11 EL OZONO

11.1 Generalidades

El ozono es un gas incoloro e inestable de tres átomos de oxígeno (su fórmula química es O_3), además, es un oxidante fuerte, muy fácil de producir pero a la vez muy frágil y fácil de destruir. Este gas reacciona fácilmente con muchos compuestos químicos y es explosivo en pequeñas cantidades. Aunque su proporción es pequeñísima en comparación con otros componentes, en la estratosfera (capa de la atmósfera, ubicada entre los 16 y 50 km de altitud) es de vital importancia porque protege la vida del planeta, absorbiendo los rayos ultravioleta procedentes del Sol, particularmente la radiación UV-B en el rango de 280 a 320 nanómetros de longitud de onda, los cuales son peligrosos para la salud humana, los animales y las plantas, incluyendo al plancton marino, contribuyendo así al calentamiento de la estratosfera, que se manifiesta con el aumento de la temperatura con la altura, lo cual genera resistencia a los movimientos verticales. Por otro lado, el ozono es un gas de efecto invernadero (GEI) que absorbe y emite radiación infrarroja con lo cual contribuye al calentamiento de la troposfera. Además en la baja atmósfera y sobre superficie, el ozono se constituye en un contaminante nocivo para la salud.

En las últimas décadas y con los avances industriales, se han venido inyectando a la atmósfera sustancias agotadoras de ozono (SAO), la mayoría de las cuales son GEI, que están disminuyendo la cantidad del ozono en la estratosfera de latitudes medias y polares, como por ejemplo los CFC, que se usan en la fabricación de espuma y aerosoles, en limpiadores

industriales y en refrigeración; de esa forma se tiene un aumento de la radiación ultravioleta (UV-B), con efectos potencialmente dañinos para los diferentes componentes del sistema terrestre.

El ozono se presenta desde la superficie terrestre hasta una altura aproximada de 70 kilómetros, pero la mayor cantidad, cerca del 90%, se da en la estratosfera (entre los 16 y los 50 kilómetros, ver figura 30), con una máxima concentración entre los 19 y 35 kilómetros. Esta capa de máxima concentración se conoce como **la capa de ozono** y varía según la época del año y el lugar geográfico.



Figura 30. Distribución del ozono en altura.

A diferencia de los otros GEI, que tienen una concentración uniforme en la atmósfera, el ozono tiene un tiempo de vida corto y su distribución es controlada por procesos fotoquímicos (producción y destrucción) y dinámicos (transporte por vientos estratosféricos). Además, el ozono se produce en su totalidad dentro de la atmósfera y no es emitido a esta como los otros GEI.

Aunque en Colombia no se presenta el problema del agujero de la capa de ozono, los niveles de ozono en el país son habitualmente bajos (con mínimos del orden de 230 unidades Dobson - U.D. en enero y máximos de hasta de 285 U.D. en agosto), debido a la circulación de vientos Brewer-Dobson que transporta el ozono producido en los trópicos (zona de mayor producción en el mundo) hacia la estratosfera de las latitudes altas y medias. Se considera que existe agujero de la capa de ozono cuando los niveles de ozono se encuentran por debajo de las 220 UD.